

PEARL-Mat Endbericht

Perspektive, **A**nwendungen und **R**ichtungsweisungen für engineered
Living materials und 2D/2D+ Hybrid**MAT**erialien

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen
und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1010 Wien, Österreich

Autorinnen und Autoren: Ulrike Cihak-Bayr (AC2T research GmbH), Katharina Lang-
Hogrefe (BNN), Matiss Reinfelds (BNN)

Gesamtumsetzung: Ulrike Cihak-Bayr (AC2T research GmbH)

Fotonachweis: Bilder der Bibliographischen Analyse wurden von Andras Vernes (AC2T
research GmbH) erstellt

Wien, 2025. Stand: 1. Juni 2026

Vorwort

Das Projekt „PEARL-Mat“ wurde im Rahmen des Nano-EHS Programmes gefördert auf Basis des Österreichischen Aktionsplans Nanotechnologie und zielt darauf ab zu den zwei Materialgruppen 2D Materialien und 2D Hybridmaterialien sowie zu Engineered Living Materials die aktuellen Trends zu erheben. Insbesondere sollten die Potentiale erhoben werden als auch die regulatorischen Fragestellungen analysiert werden. Daraus ist ein Massnahmenkatalog zu erstellen gewesen, der in dem vorliegenden Bericht zusammengestellt ist.

Das Projektteam des PEARL-Mat Projektteams bedankt sich für die Förderung und wünscht Ihnen damit eine informative Lektüre zur weiteren Verwendung zur Verfügung zu stellen.

DI Dr. Ulrike Cihak-Bayr
Projektleitung

Inhalt

Vorwort	3
1 Literaturrecherche.....	6
1.1 Fokus 2D (hybrid) Materials.....	6
1.2 Fokus Engineered Living Materials (ELM).....	12
1.3 Literaturanalyse: Fokus 2D (hybrid) Materials (2DH)	13
1.4 Literaturanalyse: Fokus Engineered Living Materials (ELM)	28
2 Expert:innen-Interviews	38
2.1 Engineered Living Materials Expert:innen.....	40
2.2 2DH Materialien Expert:innen	44
3 Stakeholder:innen Workshop	51
4 Trendanalyse.....	60
4.1 2D/2DHybrid Materialien Fokus International	60
4.2 2DH Trends in Österreich.....	74
4.3 Engineered Living Materials Fokus International	78
4.4 Engineered Living Materials Fokus Österreich	87
5 Zusammenfassung und Ausblick	94
5.1 Handlungsempfehlungen aus der 2D Community	94
5.2 Handlungsempfehlungen aus der ELM Community	98
Tabellenverzeichnis.....	100
Abbildungsverzeichnis.....	102
Literaturverzeichnis	104

Executive Summary

2D Materialien werden weltweit vor allem mit Graphen, MXenen, TMDCs, Heterostrukturen und Graphenoxid assoziiert; bibliographische Analysen zeigen, dass sich der fachliche Fokus zwischen 2020 und 2025 nicht grundlegend, sondern nur graduell verschiebt, wobei MXene relativ zu Graphen an Bedeutung gewinnen, zudem ist ein klarer Trend zu hybriden Materialien und Kombinationen mehrerer 2D Gruppen erkennbar. Anwendungsnah dominieren seit 2020 Photo und Elektrokatalyse, Energiespeicherung, Sensorik, Photonik, 3D Printing und Spintronik. Für die industrielle Zulassung, die Hochskalierung und ökologische Akzeptanz werden zunehmend Sicherheits-, Risiko- und Nachhaltigkeitsaspekte, Nanotoxikologie und grüne Synthese entscheidend.

Die österreichische 2DH Forschung zeigt eine Symbiose aus hochpräziser Analytik und kontrollierter Syntheseexpertise aus. Forschungsarbeiten auf Graphenen, MXenen, h.BN und MoS₂ schaffen Potentiale in der Quantentechnologie, Sensorik, und funktionalen Schichten in Elektronik, Luft- und Raumfahrt, als EM Abschirmung und auch in der Biotechnologie. Österreich kann als Enabler für die europäische technologische Souveränität der Post-Silizium fungieren sowie als Deep-Tech-Hub für marktreife Hochskalierung im Energiewendebereich und der Umwelttechnik.

Im Bereich der ELM besteht der größte Handlungsbedarf in der Überwindung fragmentierter Förderstrukturen zugunsten einer langfristigen, im Einklang mit der Industriestrategie 2035 stehenden Roadmap, die Interdisziplinarität in Ausbildung und Begutachtung sowie eine engere Kooperation zwischen Forschung und Industrie forciert. Flankiert werden muss dieser Prozess durch eine präzisere Begriffsdefinition, flexiblere regulatorische Rahmenbedingungen und eine stärkere Gewichtung von Konsumentensicherheit und Kreislauffähigkeit, um die Marktreife innovativer Materialien effizient und verantwortungsbewusst zu erreichen.

Für beide Materialgruppen gilt es institutionalisierte Netzwerke zu schaffen und inselartige Forschungsstrukturen in Österreich stärker zu verbinden. Durch teils potentiell gemeinsame Anwendungsfelder wie Sensorik und Verbundwerkstoffe ist auch eine Vernetzung von ELM und 2DH Community anzudenken.

1 Literaturrecherche

Die beiden Materialgruppen Engineered Living Materials (ELM) und 2D (hybrid) Materialien (2DH) werden getrennt dargestellt, weil sie in der wissenschaftlichen Community separiert auftreten und trotz der teils gemeinsamen Anwendungsfelder derzeit keine strukturell koordinierten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten aufweisen.

Herangehensweise zur Literaturrecherche

1.1 Fokus 2D (hybrid) Materials

Definitionsgemäß sind zweidimensionale Materialien (2D-Materialien) kristalline Festkörper mit einer zweidimensionalen Translationssymmetrie. Das bedeutet, dass sie in der dritten Dimension keine periodische Wiederholung aufweisen. Folglich bestehen 2D Materialien entweder aus einer einzelnen Atomlage, wie beispielsweise Graphen, oder aus wenigen Atomlagen mit einer Dicke von typischerweise weniger als 1 nm.

Diese Materialien zeichnen sich durch starke Bindungen innerhalb der Ebene (in-plane) und schwache Van-der-Waals-Wechselwirkungen zwischen den Ebenen (out-of-plane) aus. Aufgrund dieser Struktur besitzen 2D Materialien einzigartige elektronische, mechanische und optische Eigenschaften. Die Herstellung erfolgt entweder über Top-Down-Verfahren (z. B. Exfoliation) oder über Bottom-Up-Methoden (z. B. chemische Gasphasenabscheidung). Da sich ihre Eigenschaften gezielt beeinflussen lassen – etwa durch Modifikation der Defektstruktur (englisch: Defekt-Engineering) –, gelten sie als vielversprechende Kandidaten für industrielle Optimierungen und neuartige Anwendungen, beispielsweise als Ersatz für Silizium in elektronischen Bauteilen.

Methodiken der Literaturrecherche

Die umfangreiche wissenschaftliche Literatur zu 2D Materialien wurde mittels bibliometrischer Analyse analysiert.

Darüber hinaus wurden LLM wie Perplexity in Kombination mit Chat-GPT4, NotebookLM und Google Gemini verwendet, um die öffentlich zugänglichen Informationen zu filtern und unterstützend für die Analyse zu verwenden.

Es wurden die 2D Roadmap des Graphene Flagships und deren Berichte und Veröffentlichungen in die Literatursuche miteinbezogen, ebenso wie die Berichte der schwedischen Initiative Sio-Graphene und ein Position Paper der Europäischen Quantumtechnologie-Industrie zum European Innovation Act.

Bibliometrische Analyse

Um eine Übersicht über 2D Materialien zu erhalten, wurde eine Datenbank mit relevanten Fachinformationen erstellt. Im ersten Schritt wurden hierfür verfügbare Publikationen zu diesem Themengebiet zusammengetragen. Als Rechercheplattform diente Web of Science¹. Unter Verwendung der dortigen Analysetools wurde eine Suche mit den Begriffen „2D material*“ ODER „two-dimensional material*“ durchgeführt.

Die Suche umfasste alle Suchfelder. Damit wurden alle Publikationen erfasst, in denen mindestens einer der Begriffe im Titel, in der Zusammenfassung, in den Schlagwörtern oder in anderen Metadaten vorkommt. Die Recherche ergab insgesamt über 220.000 Publikationen (Abbildung 1). In den vergangenen Jahren wurden jährlich mehr als 15.000 bis 20.000 Arbeiten zu diesem Thema veröffentlicht (Abbildung 2). Daraus lässt sich ein enormes Interesse an 2D-Materialien ableiten und zeigt, dass 2DH ein zukunftssträchtiges Forschungsfeld ist.

Die detaillierte Betrachtung des Histogramms in Abbildung 2 verdeutlicht, dass die Anzahl der jährlichen Publikationen teilweise sprunghaft angestiegen ist. Nur einige dieser Anstiege lassen sich eindeutig spezifischen Entwicklungen zuordnen. Ein Beispiel ist der Anstieg im Jahr 2020, der zwei Entwicklungen zugeordnet werden kann: Einerseits der massiv gestiegenen Bedeutung von 2D Materialien für gedruckte Photonikelemente, andererseits einer gestiegenen Häufigkeiten von Veröffentlichungen zu MXenen, einer speziellen 2D Materialgruppe.

¹ <https://clarivate.com/de/products/scientific-and-academic-research/>

Die hohe Anzahl allein von Literaturreviews ist nicht über eine klassische menschliche Sichtung zu bewältigen. Für die weiteren Analysen wurde die Software VOSviewer² gewählt, da sie eine benutzerfreundliche Oberfläche bietet und intuitiv interpretierbare Grafiken erzeugt.

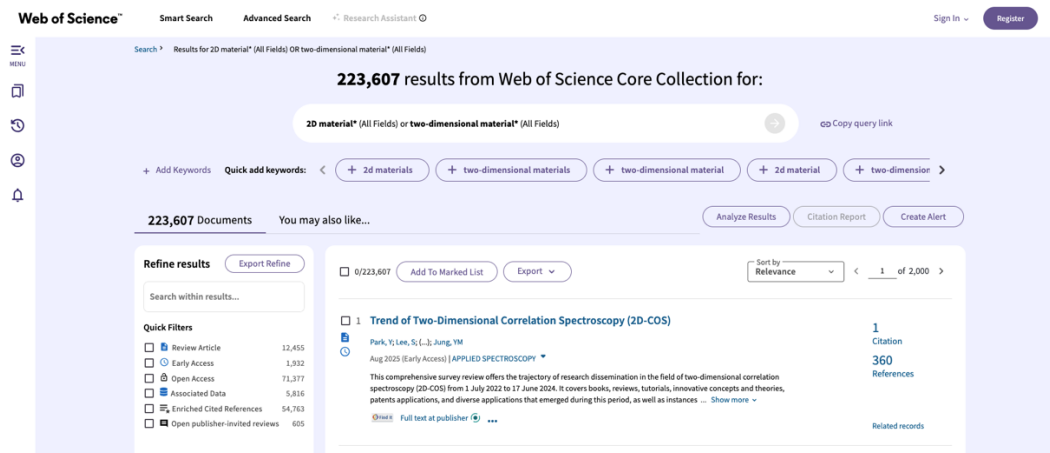


Abbildung 1- Ergebnisse der Web-of-Science Plattform für die Suche nach 2D Materialien (Stand 21. März 2026)

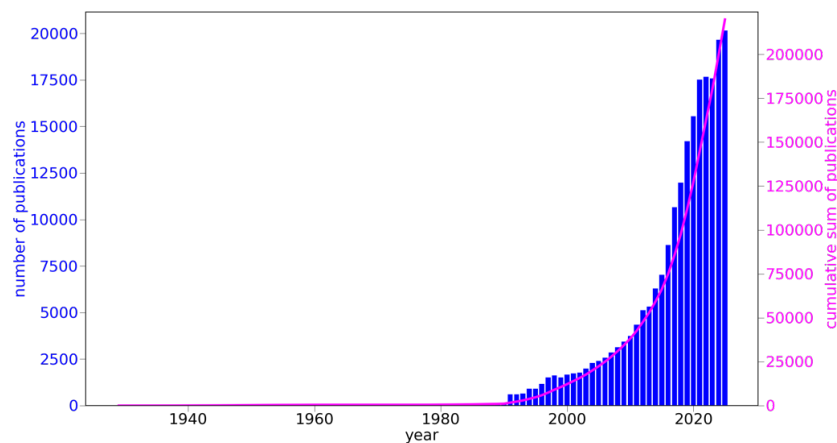


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichungen in vertikalen Balken, linke vertikale Achse: jährliche Anzahl, rechte Achse: kumulative Häufigkeiten.

² <https://www.vosviewer.com/>

Funktionsweise des VOSviewer

Das Akronym VOS steht für „Visualization of Similarities“ (Visualisierung von Ähnlichkeiten). Die Software VOSviewer ist ein distanzbasiertes bibliometrisches Kartierungswerkzeug und dient dazu, VOS-Karten zu erstellen und zu visualisieren³.

Die sogenannte Kookkurrenzmatrix beschreibt das gemeinsame Vorkommen zweier Begriffe in einem übergeordneten Zusammenhang. Die Elemente c_{ij} geben dabei an, wie oft zwei Begriffe i und j gemeinsam auftreten. Im nächsten Schritt wird diese Anzahl mit der Anzahl des Vorkommens jedes einzelnen Begriffes w_i und w_j normiert und ergibt s_{ij}

$$s_{ij} = \frac{c_{ij}}{w_i w_j}$$

Die Erstellung einer zweidimensionalen (2D) VOS-Karte mit diesen Begriffen erfordert eine Verteilung der Objekte in der Ebene, sodass der Abstand zwischen zwei Begriffen deren Ähnlichkeit widerspiegelt. Paarungen mit geringen Abständen s_{ij} zueinander werden zu Gruppen zusammengefasst. Das Ergebnis ist eine Netzwerkdarstellung der resultierenden 2D-VOS-Karte, wie sie in Abbildung 3 gezeigt ist. Innerhalb dieser Netzwerkansicht gelten folgende Visualisierungsregeln:

Bedeutung: Je häufiger ein Begriff ist, desto größer werden die Beschriftung und der zugehörige Kreis dargestellt.

Gruppierung: Verschiedene Farben kennzeichnen die Gruppen, denen die jeweiligen Begriffe zugeordnet sind.

Alternativ erlaubt die Dichte-Ansicht eine farbliche Darstellung der Bedeutung und der Wechselbeziehungen verschiedener Themen zueinander, somit die Stärke der Verknüpfungen. Begriffe, die oft zusammen zitiert werden, sind in gelben Wolken dargestellt. Seltener zusammen auftretende Begriffe erscheinen in der Dichte-Ansicht am Rand im blauen Feld. Der Farbverlauf verwendet Regenbogenfarben.

Der VOS Viewer verwendet zur Erstellung der 2D Karten verschiedene mathematische Optimierungstechniken, die allerdings keine eindeutige geometrische Lösung bieten.

³ N. J. van Eck und L. Waltman, Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping, *Scientometrics* 84(2), 523 (2010).

Daher kann die Darstellung desselben Datensatzes bei erneutem Durchlauf zu einem geringfügig anderen Bild führen.

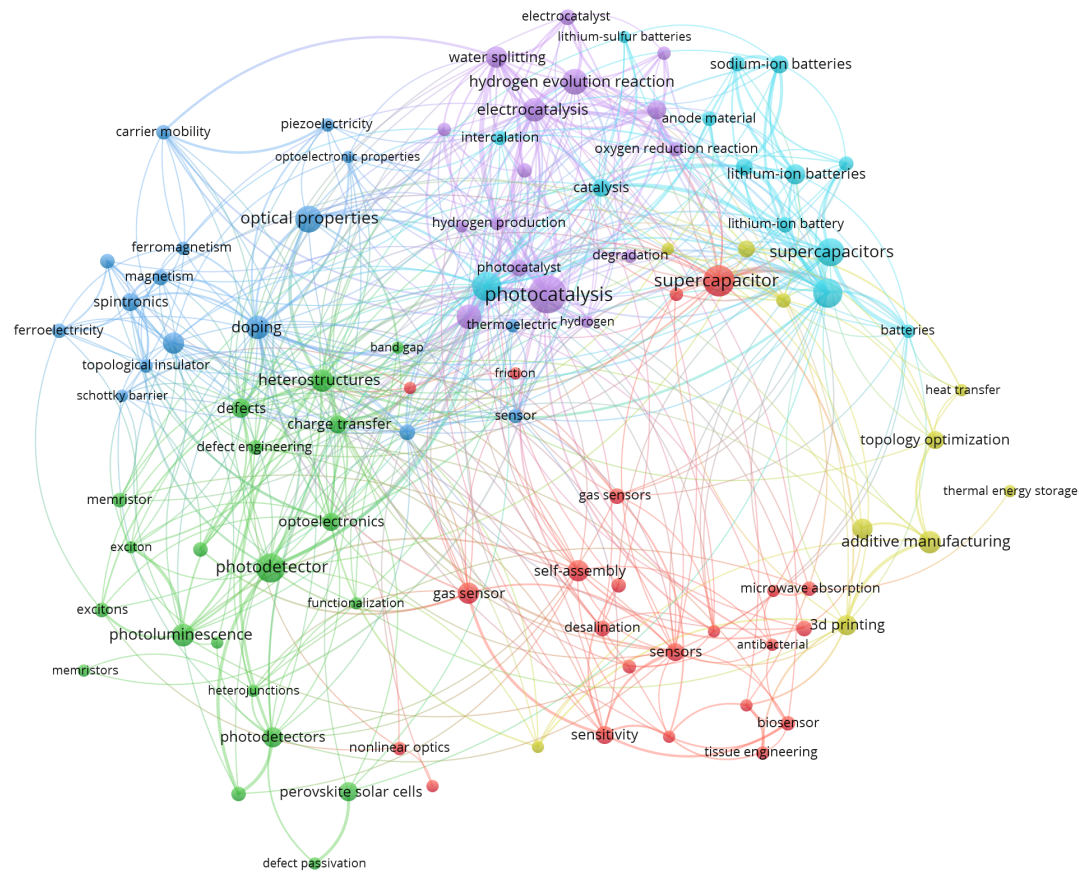


Abbildung 3: Eine Netzwerkdarstellung einer 2D VOS Karte mit den Begriffen der Anwendungsfelder von 2D Materialien am Beispiel der Veröffentlichungsdaten aus 2024.

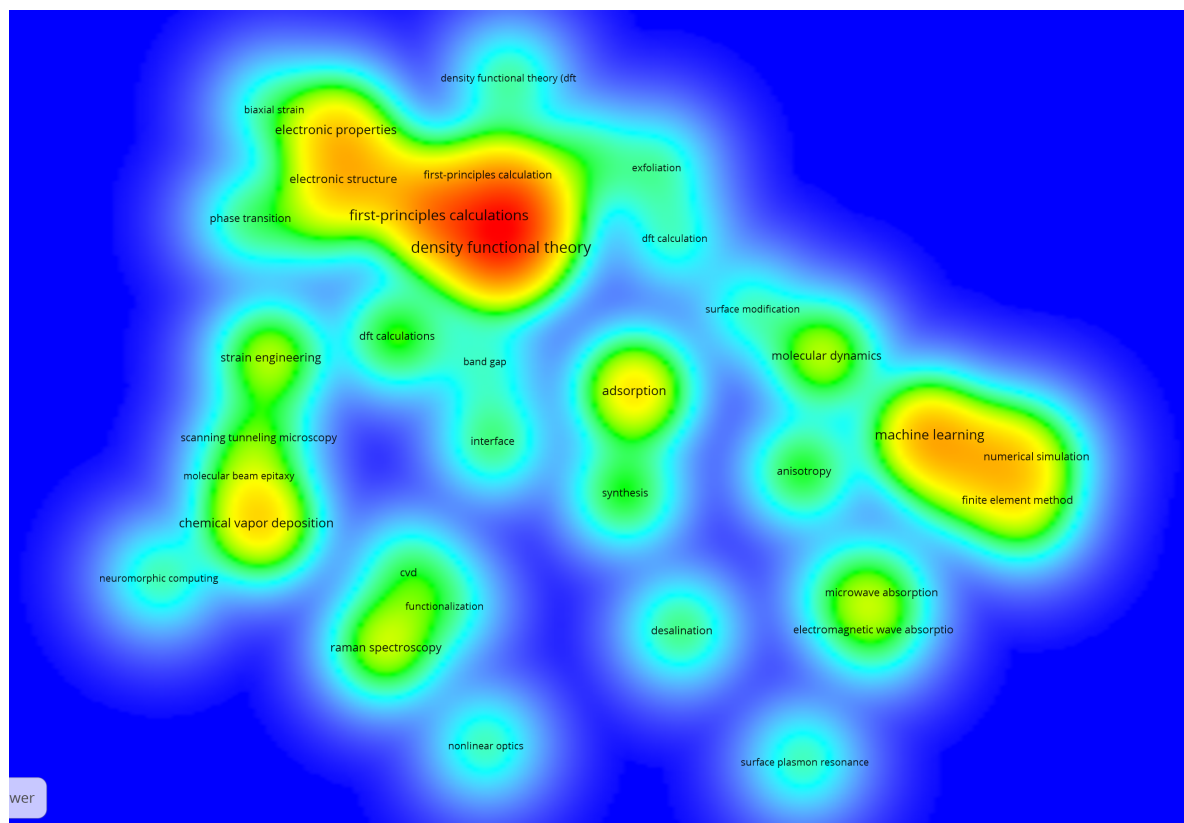


Abbildung 4: Dichte Ansicht der VOS Karte anhand des Beispiels von im Jahr 2024 verwendeten Methoden, die in den Autoren Keyword verwendet wurden.

Da die letzten 5 Jahre (2020-2025) 49% der Review-Veröffentlichungen ausmachen, wurde die Analyse pro Jahr durchgeführt, um die Anzahl der Veröffentlichungen auf ca. 20.000 zu reduzieren. Da dies dennoch zu einer zu großen Anzahl an Begriffen führt, wurden die Begriffe auf die Keywords, die von den Autoren vorgegeben wurden, beschränkt. Zudem wurde die Zusatzbedingung eingeführt, die fordert, dass die verwendeten Begriffe zumindest 25 mal in den Veröffentlichungen des untersuchten Jahres vorkommen muss. Schließlich wurden triviale Begriffe entfernt und die Begriffe manuell in Untergruppen eingeteilt: Anwendungen, Eigenschaften, angewandte Methoden.

1.2 Fokus Engineered Living Materials (ELM)

Engineered Living Materials (ELMs) stellen eine transformative Klasse von Materialien dar, die lebende Zellen – oft genetisch verändert – innerhalb von Matrizen integrieren, um Materialien mit dynamischen, adaptiven und programmierbaren Funktionen auszustatten. ELMs können sich selbst heilen, spüren, auf Umweltreize reagieren oder sogar selbst replizieren, was erhebliche Vorteile gegenüber traditionellen Materialien in Bezug auf Nachhaltigkeit, Anpassungsfähigkeit und Multifunktionalität bietet (Allahbakhsh et al., 2024; Altin-Yavuzarslan et al., 2024; Gilbert & Ellis, 2019; Omer et al., 2022; Rivera-Tarazona et al., 2021; Rodrigo-Navarro et al., 2021). Im Bereich der Nachhaltigkeit haben ELMs vor allem bei ökologischen Gesichtspunkten großes Potenzial, durch die Verwendung biobasierter Ausgangsstoffe, Reduktion schädlicher Emissionen in der Herstellung und Langlebigkeit durch Selbstheilungsfunktionen. Das Fachgebiet hat sich rasant an der Schnittstelle von Synthetikbiologie, Materialwissenschaft und Ingenieurwesen entwickelt, mit Anwendungen in Medizin, Umweltsanierung, Energie, Bauwesen und intelligenten Geräten (An et al., 2022; Dong et al., 2025; Guimarães et al., 2022; Lavrador et al., 2021; Rivera-Tarazona et al., 2021; Wang et al., 2022). Diese Übersicht bietet eine umfassende Analyse der vorherrschenden Klassifikationsschemata, einen Überblick über modernste Herstellungsmethoden und sektorspezifische Anwendungen (mit Schwerpunkt auf medizinischen und ökologischen Bereichen). Sicherheits-, Nachhaltigkeits- und regulatorische Herausforderungen werden kritisch bewertet, einschließlich der Umsetzung des von der Europäischen Kommission empfohlenen Safe-and-Sustainable-by-Design-(SSbD)-Rahmens (Allahbakhsh et al., 2024; An et al., 2022; Ebbesen et al., 2024; Heveran et al., 2024)

Die Literaturrecherche wurde mit Hilfe von Web of Science, Consensus, Semantic Scholar, Google Scholar, PubMed und andere Datenbanken durchgeführt.

Identifizierte Paper	Berücksichtigte Paper
1049	40

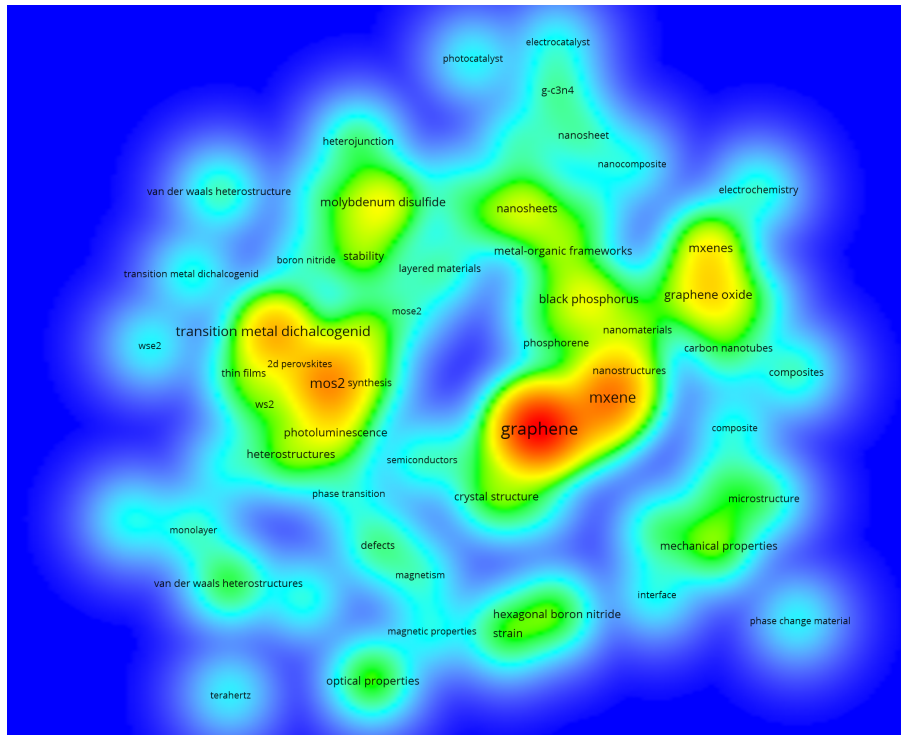


Abbildung 6: Dichte VOS-Karte der Begriffe zu den 2D Materialgruppen im Jahr 2020

Bereinigt man die vom Algorithmus identifizierten Begriffe von jenen der chemischen Strukturbezeichnung und fokussiert auf Begriffe, die Anwendungsgebiete anzeigen, dann findet sich folgende Themenführerschaft (Abbildung 7, Abbildung 8):

2025: photocatalysis, supercapacitor, energy storage, batteries, electrocatalysis, hydrogen evolution, photodetector, 3D printing, spintronics, gas sensors

2020: photocatalysis, electrocatalysis, energy storage, supercapacitor, batteries, 3D printing, photodetector, optoelectronics, thermal conductivity

Über den Zeitraum 2020-2025 in dem die Anzahl an Veröffentlichungen massiv gestiegen ist, haben sich die anwendungsnahen Themen nicht grundsätzlich geändert. Allerdings wurden 2020 die Themen noch isolierter betrachtet, während in 2024 die Begriffe deutlich vernetzter sind und auch in ihrer Anzahl steigen. Damit kristallisiert sich in 2024 und 2025 ein noch deutlicherer Fokus auf Photo- und Elektrokatalyse und Superkondensatoren heraus. Da jedoch die absolute Gesamtzahl an Veröffentlichungen exponentiell gestiegen ist, bedeutet das nicht, dass andere Themen wie 3D printing, photo detector, sensors, spintronics weniger beforscht werden, im Gegenteil auch diese Themen erleben massiv gesteigerte Forschungstätigkeiten wie Abbildung 9 bis Abbildung 12 illustrieren.

The heatmap displays research trends across various scientific fields from 2006 to 2019. The color scale ranges from blue (low density) to red (high density). Key clusters include:

- Energy Storage:** A prominent red cluster in the upper right quadrant, centered around "energy storage," with related terms like "super capacitor," "hydrogen evolution reaction," "oxygen reduction reaction," "electrocatalyst," "water splitting," "hydrogen evolution," "hydrogen evolution reaction," "adsorption," "hydrogen storage," "photocatalysis," "photocatalytic water splitting," "lithium-sulfur batteries," "sodium-ion batteries," "anode," "photocatalyst," "sensor," "metal-organic frameworks," "gas sensor," "electrochemical sensor," "lithium-ion battery," "sensors," "antibacterial," "desalination," "tissue engineering," "3d printing," "microfluidics," "additive manufacturing," "metamaterials," "biosensors," "self-powered," "photodetectors," "field-effect transistor," "nonlinear optics," "flexible electronics," "optoelectronics," "spintronics," "ferromagnetism," "superconductivity," "gas sensors," "metal-organic frameworks," "environmental remediation," "energy harvesting," "biosensor," "metasurface," "solar cells," "photodetector," and "photocatalytic water splitting."
- Sensors:** An orange cluster in the center-right area, featuring "sensors," "electrochemical sensor," "lithium-ion battery," "antibacterial," "desalination," "tissue engineering," "3d printing," "microfluidics," "additive manufacturing," "metamaterials," "biosensors," "self-powered," "photodetectors," "field-effect transistor," "nonlinear optics," "flexible electronics," "optoelectronics," "spintronics," "ferromagnetism," "superconductivity," "gas sensors," "metal-organic frameworks," "environmental remediation," "energy harvesting," "biosensor," "metasurface," "solar cells," "photodetector," and "photocatalytic water splitting."
- Photocatalysis:** A yellow cluster in the upper left area, featuring "photocatalysis," "photocatalytic water splitting," "lithium-sulfur batteries," "sodium-ion batteries," "anode," "photocatalyst," "sensor," "metal-organic frameworks," "gas sensor," "electrochemical sensor," "lithium-ion battery," "sensors," "antibacterial," "desalination," "tissue engineering," "3d printing," "microfluidics," "additive manufacturing," "metamaterials," "biosensors," "self-powered," "photodetectors," "field-effect transistor," "nonlinear optics," "flexible electronics," "optoelectronics," "spintronics," "ferromagnetism," "superconductivity," "gas sensors," "metal-organic frameworks," "environmental remediation," "energy harvesting," "biosensor," "metasurface," "solar cells," "photodetector," and "photocatalytic water splitting."
- Photodetectors:** An orange cluster in the lower left area, featuring "photodetector," "field-effect transistor," "nonlinear optics," "flexible electronics," "optoelectronics," "spintronics," "ferromagnetism," "superconductivity," "gas sensors," "metal-organic frameworks," "environmental remediation," "energy harvesting," "biosensor," "metasurface," "solar cells," "photodetectors," "self-powered," "photodetector," and "photocatalytic water splitting."

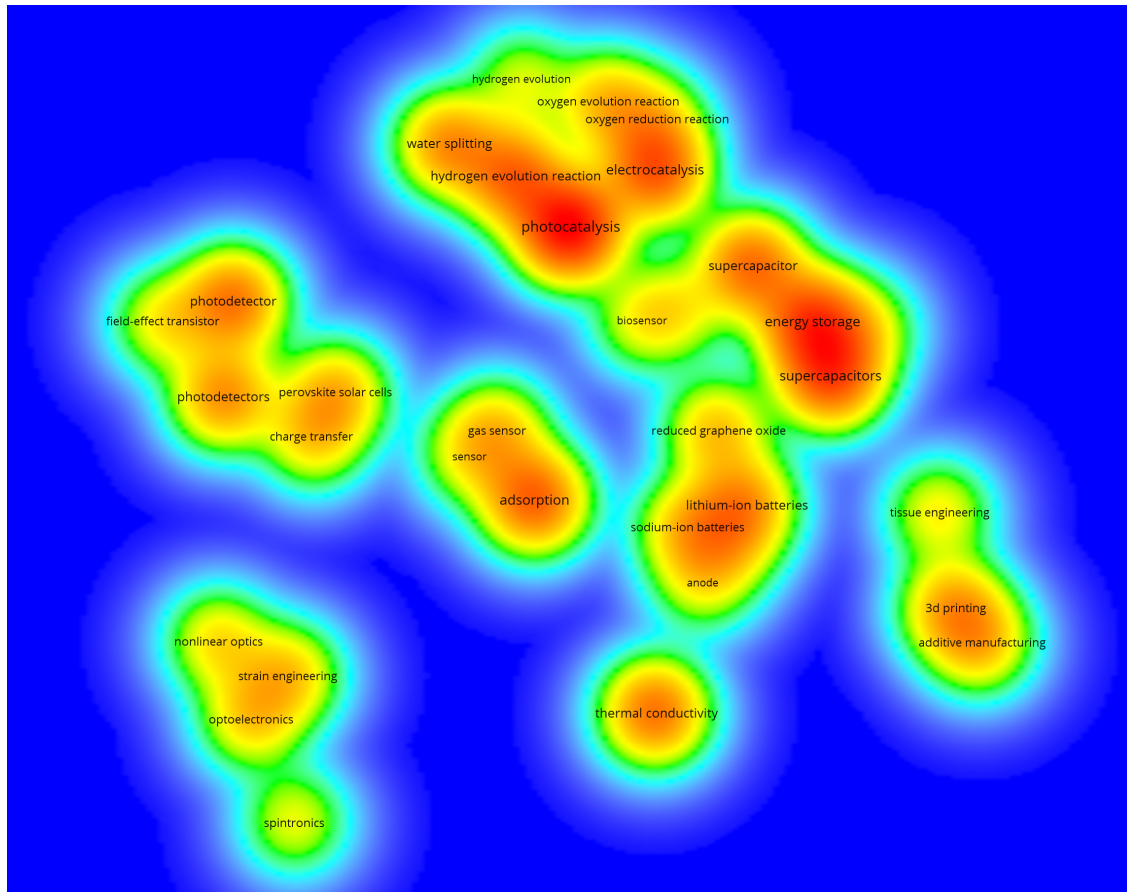


Abbildung 8: Dichte Landkarte der Anwendungsbereiche von 2DH im Jahr 2020.

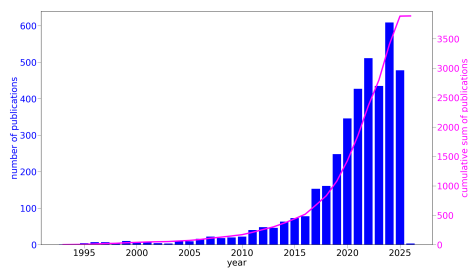


Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung des Themas Sensoren

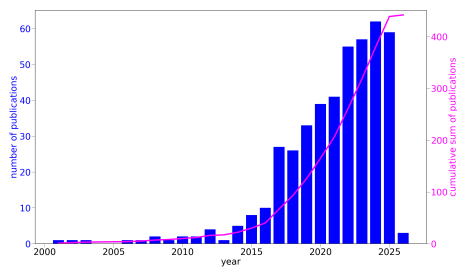


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des Themas spintronics

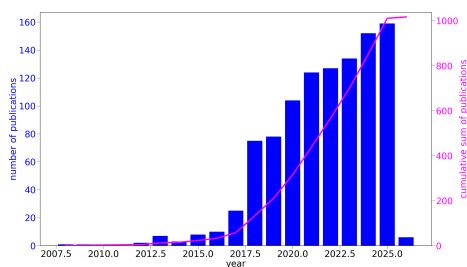


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des Themas watersplitting

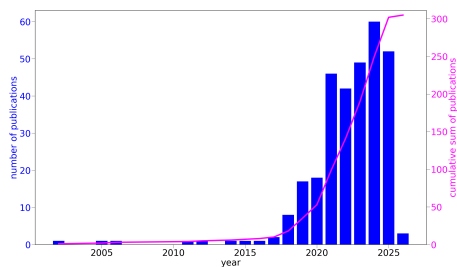


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung des Themas Entsalzung (desalination)

Autoren in Japan

Die mit Abstand höchste Anzahl an Veröffentlichungen stammt von zwei japanischen Autoren: Prof. Taniguchi und Prof. Watanabe, beide Materialwissenschaftler am National Institute for Material Science (NIMS) in Tsukuba. Beiden gelang die Herstellung von ultrareinen **hexagonalen Bornitrid h-BN**, womit sie weltweit Labore für Forschungszwecke

*h-BN wird als „weißer Graphit“ bezeichnet und hat eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, ist aber gleichzeitig ein elektrischer Isolator und hat herausragende chemische und thermische Beständigkeit. Es ist sehr kompatibel mit anderen 2D Materialien, um Hybride zu bilden. **Anwendungen:** Thermisches Management in Leistungselektronik (E-Autos, 5G-Antennen), atomar dünnen Isolationsschicht in Transistoren und Kondensatoren, Schmiermittelzusatz in Raumfahrt oder Hochtemperaturöfen, Quanten-Emitter für abhörsichere Kommunikationsnetze.*

18 von 112

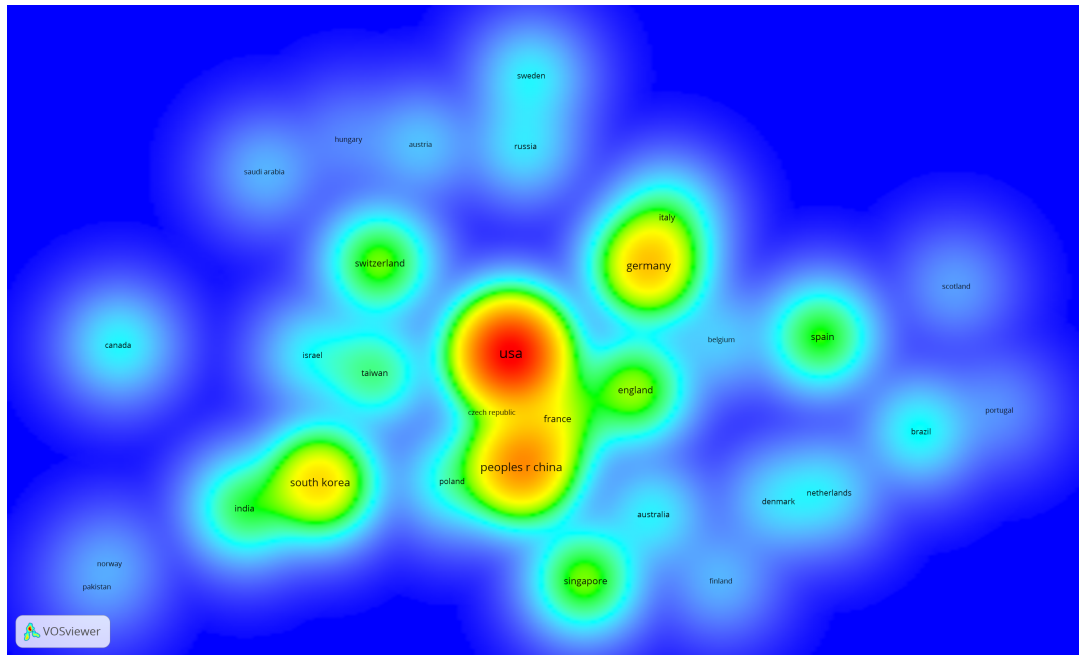


Abbildung 14: Länder in denen Kooperationspartner der Prof- Taniguchi und Prof. Watanabe liegen. Die USA (rotes Feld) kooperiert am häufigsten, Deutschland und Südkorea (gelbes Feld) ca. gleich intensiv und Österreich (blaues Feld) ist erkennbar.

Roadmaps und Position Papers

Klassifizierung von 2D Materialien und Anwendungsmöglichkeiten

Typischerweise werden 2D Materialien nach ihrer chemischen Strukturformel klassifiziert. Das Graphene Flagship rechnet Graphene nicht zu den 2D Materialien, sondern führt es als eigene Materialklasse. Die 2D Roadmap des Graphene Flagships schlägt folgende Klassifizierung vor.

a) **TMDCs:** Übergangsmetal-Dichalkogenide, Kurzformel MX₂

Eine Ebene mit Metallatomen (Mo, Ti, W) ist eingebettet zwischen zwei Schichten von Chalkogenatomen (Schwefel, Selen, Tellur), die Verbindung zwischen den Schichten sind schwache Van-der-Waals Kräfte

- Typische Beispiele: MoS₂, WSe₂
- Eigenschaften: Elektrisch einstellbar von metallisch bis Halbleiter je nach Zusammensetzung und Struktur, Photolumineszenz
- Anwendungsmöglichkeiten: Transistoren (effizienter, kleiner); Flexible, tragbare Sensoren, Energie (Photovoltaik, Photokatalyse, Elektrokatalyse)

b) **MXene** Sind Karbide, Nitride und Karbonitride der Übergangsmetalle.

Erste Synthese 2011 an der Drexel University (USA),
 M Übergangsmetall, X Kohlenstoff und/oder Stickstoff, T steht für Endgruppen wie OH, O, Halogen, Chalkogene
 Herstellung erfolgt über Bulkmaterialien, den MAX Phasen durch selektive Ätzung von typischerweise Aluminium oder Silizium. Haben im Gegensatz zu anderen 2D Materialien kein Bulk-Analog wenn man MXene wieder zusammenstapelt.

- Typische Beispiele: Ti₂C, Ti₃C₂, V₂C
- Eigenschaften: Leitfähigkeit einstellbar von hohe metallische zu Halbleiter, hydrophil, hochfest (z.B.: Hybride mit Zellulose gleichwertig mit Stahl)
- Anwendungsmöglichkeiten: Energiespeicherung (Superkondensatoren, Batterien), Katalyse, Sensoren, Elektromagnetische Abschirmung

c) **Hexagonal Boron Nitride (h-BN)**

Hat eine hexagonale Gitterstruktur wie Graphen mit einer alternierenden Besetzung durch Bor und Stickstoffatome.

- Eigenschaften: Isolator, extrem hohe thermische und chemische Stabilität, hohe thermische Leitfähigkeit
- Dielektrisches Material, Temperaturmanagement, Hochtemperaturanwendungen
- Anwendungsmöglichkeiten: Elektronik (als dielektrisches Material in Field-Effect Transistoren FETs) , Photonik, Weltraum; ideal flache Basis für Graphene

d) **Hexagonal Aluminum Nitride (h-AlN)**

Ist ein Wide-Bandgap-Halbleiter (WBG) haben Bandlücken von 2-4 eV und übertreffen Si in Effizienz, Temperatur,- Frequenz – und Spannungsfestigkeit; oft Substratmaterial für GaN,

- Eigenschaften: hohe thermische Leitfähigkeit, hohe elektrischer Widerstand, chemisch inert, hohe piezoelektrische Eigenschaften
- Anwendungsmöglichkeiten: Elektronik (kleinere, leichtere, effizientere Leistungselektronik für E-Mobility und erneuerbare Energien), Optoelektronik (UV Photodetektoren, Hochleistungs-LEDs), akustische Oberflächenwellen-Bauelemente (SAW; Umwandlung von elektrischen Signalen in akustische Oberflächenwellen für z.B.: Signalfilterung oder batterieelose Sensoren, robuste Touchscreens)

Nicht von Graphene Flagship identifizierte 2D Materialgruppen:

LDhs Layered Double Hydroxides sind anionische Tone oder Hydrotalcit ähnliche Verbindungen

Positive geladene Schichten von Metallhydroxiden zwischen denen sich bewegliche Anionen und Wassermoleküle befinden und einen Ladungsausgleich ermöglichen, arbeitet als Ionentauscher

- Eigenschaften: Memory-Effekt (nach dem Erhitzen können sie mit Kontakt mit Wasser und Anionen die ursprüngliche Schichtstruktur herstellen), hohe Biokompatibilität, stabil in Wasser
- Anwendungsmöglichkeiten: medizinische Anwendungen als Trägersysteme (Drug-Delivery), Umwelt (Entfernung von Schadstoffen, Abwasserreinigung), Flammschutzmittel in Polymeren, UV-Stabilisator in Asphalt, Korrosionsschutz-Schichten, Superkondensatoren, Batterien, Wasserspaltung

e) 2D MOFs Metall-Organic Frameworks (Metallorganische Gerüststruktur)

Metallische Knotenpunkte, die durch organische Verbindungen verknüpft sind, arbeitet wie ein molekularer Schwamm, lösen sich mit der Zeit in Wasser auf

- Eigenschaften: höchste Porosität
- Anwendungsmöglichkeit: Gasspeicherung (Wasserstoff), Gasseparierung (CO₂ aus Abgas herausfiltern), Katalyse, Wassererzeugung (aus der Luftfeuchtigkeit), Sensorik (Schadstoffdetektion)

f) Monoelementare 2D Materialien

Graphen

Silicen

Schwarzer Phosphor (Eigenschaften: hohe Ladungsträgermobilität, hohe Anisotropie, instabil an Luft, elektrochemische Energiespeicherung)

g) Metallfreie polymere Halbleiter

g-C₃N₄; bestehen nur aus Kohlenstoff und Stickstoff, die in einer Schichtstruktur angeordnet sind, haben eine Bandlücke und sind daher Halbleiter

h) Heterostrukturen

Van-der-Waals Heterostrukturen: Graphene und MXene oder h-BN kombiniert (Anwendung: effiziente Solarzellen, kleinste Quantenbauteile)

Brucit-ähnliche Strukturen: Mg(OH)₂, Ca(OH)₂ (Anwendung: Flammschutz)

Schicht-Silikate

Metall-Hydrid-Nanosheets: Mg₂H₂, TiH₂ (Anwendung: Wasserstoffspeicher)

Seltene Erden Hydroxides REH (Hochgradig lumineszent, Anwendung: Optische Sensoren, Bio-Imaging, Fälschungssicherheit)

Herstellmethoden von 2D Materialien

Graphen und MXene werden oftmals über die **Exfoliationsmethode der Flüssigphase** (Top-Down) hergestellt. MXene werden vorher einer selektiven Ätzung der Zwischenschichten aus typischerweise Aluminium oder Silizium unterzogen, um die Schichten aus einer Bulkprobe herzustellen. Dieser Prozess wird für die Herstellung von Tinten auf der Basis von 2D Materialien verwendet

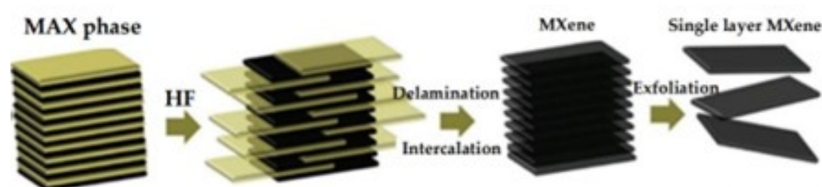


Abbildung 15: Herstellprozess von MXenen (Quelle: <https://www.safari-project.eu/mxenes/>)

CVD (Bottom-Up): Graphen und h-BN werden über die Abscheidung auf z.B. Kupferfolien im CVD Prozess erzeugt. Dies ermöglicht die Herstellung von transparenten, flexiblen Elektronik-Bauteilen oder Anti-Korrosionsschichten

Mechanische Exfoliation verwendet Grundmaterialien wie z.B. SiO₂ um darauf dünne Filme aufwachsen zu lassen (Chipindustrie)

LDHs werden über eine Reihe von unterschiedlichen Herstellmethoden erzeugt: **Fällung, Harnstoff-Hydrolyse, Hydrothermale Synthese, Sol-Gel Verfahren**, Rekonstruktion
g-C₃N₄ wird über **Thermische Polymerisation** von Harnstoff, Malmin oder Dicyandiamid

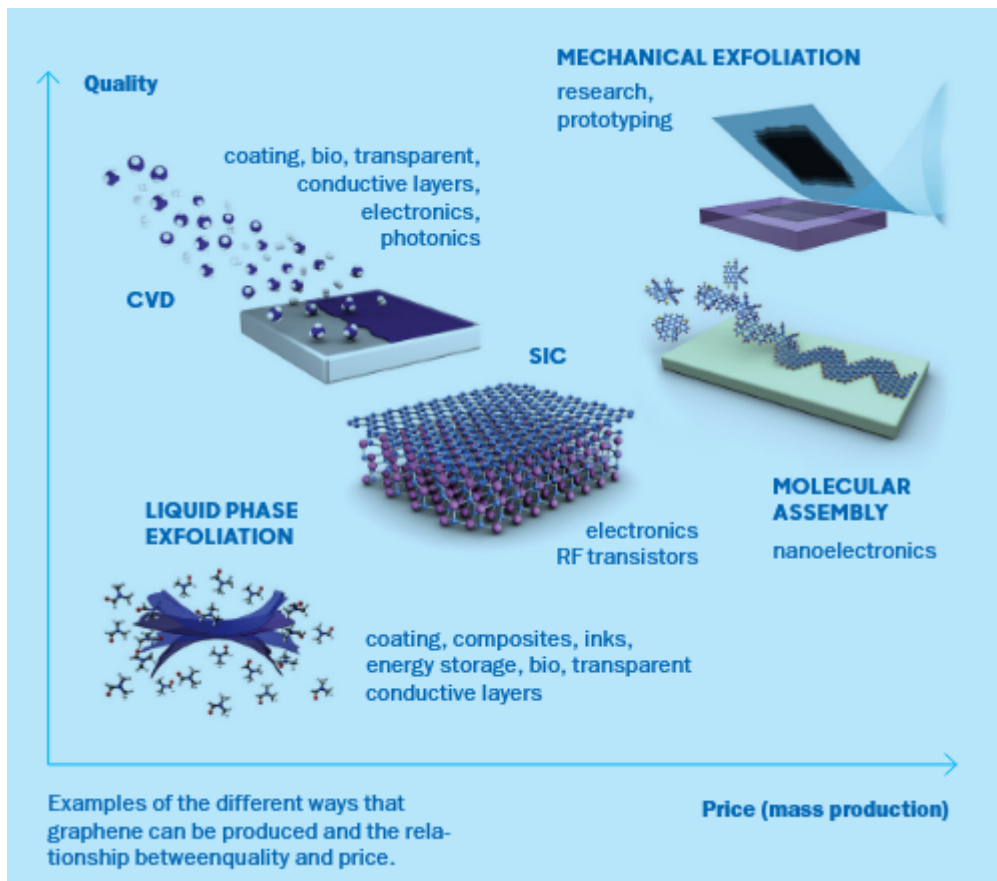


Abbildung 16: Herstellprozesse von Graphen und 2D Materialien (Quelle: <https://graphene-flagship.eu/media/llujqi2r/a5-production-brochure-2022.pdf>)

Anwendungsfelder von 2D Materialien

Die Anwendungsfelder der 2D Materialgruppen überlappen sich extrem stark. Die Verwendung wird meist durch die am meisten optimierte Eigenschaftskombination definiert. Kaum eine Materialgruppe disqualifiziert sich aber dadurch für die Anwendung in völlig anderen Einsatzgebieten. So wird Graphen mit Stickstoff dotiert in der

Quantentechnologie verwendet aber auch als Kompositzusatz in der Zementanwendung, um die thermische Haltbarkeit zu erhöhen. Auch ist eine Zuordnung zu den 4 bzw.- 5 Anwendungsgebieten der IAM4EU Initiative (energy, mobility, electronic, construction, health) nicht eindeutig möglich. Untenstehende Auflistung lehnt sich an dieser Einteilung dennoch so weit es geht an und gibt Beispiele für Anwendungsfelder und die jeweilige 2D Materialgruppe, ohne jedoch den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben Tabelle 3 - Tabelle 7.

Oftmals ist eine Kombination von mehreren 2D Materialien für einen Anwendungsbereich zielführend. Im Bereich der **Batterien** können h-BN als Schutzschicht für thermisches Management dienen und auch als Anodenmaterial. Zusätzlich können MOFs in den Elektrolyten eingesetzt werden und die Ionenleitfähigkeit verbessern und die Stabilität von Ladezyklen erhöhen.

2D Materialien werden in der **Quantentechnologie** eingesetzt und bieten das Potential die Geschwindigkeit der Datenübertragung und Speicherkapazität noch weiter drastisch zu erhöhen.

Weiters finden sich Anwendungen als **reaktive Schichten**, die unerwünschte Elemente einlagern oder Moleküle durch aktive chemische Reaktionen zerstören können.

Die hohe Oberfläche und die geringe Höhe ermöglichen Einsätze als **Sensoren**, aber auch als Trägermedium für pharmazeutische Stoffe oder für Dünger in der Landwirtschaft.

Die Anwendung in der **Tribologie** als Verschleißschutzschicht oder Zusatz in Schmierstoffen ist ein vergleichsweise kleineres Anwendungsgebiet.

Tabelle 1: Anwendungsbereich Elektronik

Anwendung	2D Materialgruppe
Quantenelektronik (Mikrochips)	TMD
	(dotierte) Graphene
	Heterostrukturen
	h-BN
Feldeffekttransistor (FET)	Schwarzer Phosphor
Hochleistungs LEDs	TMD

Solarzellen	TMD
Photodetektoren	h-BN Heterostrukturen

Tabelle 2: Anwendungsbereich Katalyse

Anwendung	2D Materialgruppe
Elektrokatalyse	TMD LDH
zur Wasserstoffproduktion	Heterostrukturen TMD+LDH MXene (als Co-Katalysator) g-C ₃ N ₄
Photokatalyse	MOFs
CO₂ Umwandlung	Dotiertes Graphen

Tabelle 3: Anwendungsbereich Energiespeicher

Anwendung	2D Materialgruppe
Superkondensatoren	MXene
Flexible Superkondensatoren	Graphen
Metall-Ionen Batterien	MXene
Alkali-Ionen Batterien	TMDxs LDHs
Wasserstoffspeicherung	Graphenoxid MOFs + h-BN MXene TMDs (MoS ₂)
Katalysator zur Verbesserung der Feststoffspeicherkinetik	LDHs n-BN

Tabelle 4: Anwendungsbereich Sensorik

Anwendung	2D Materialgruppe
Hochsensitive chemische Sensoren	TMD N-dotiertes Graphen
Biosensoren	N-dotiertes Graphen
Gassensoren	MXene (für Ammoniak)
Dehnungs- und Drucksensoren	Schwarzer Phosphor
Feldeffekttransistor (FET)	TMD
Tragbare, flexible Sensoren	TMD MXene

Tabelle 5: Anwendungsbereich funktionelle Schutzschichten

Anwendung	2D Materialgruppe
Thermischer Flammschutz	h-BN, H-AlN LDH
Elektromagnetische Abschirmung (z.B. für kompakte 5G Geräte)	MXene
Thermisches Management	Graphen h-BN Graphen-Oxid

Tabelle 6: Anwendungsbereich Biomedizin

Anwendung	2D Materialgruppe
Photothermische Therapie	LDH MXene Graphen-Oxid(Krebszellenbehandlung durch Hitze)
Drug-Delivery	h-BN Graphen-Oxid Schwarzer Phosphor Antimonen, Bismuthen (bioabbaubar) MOFs (gezielte Wirkstofffreisetzung an Tumoren)

Tabelle 7: Anwendungsbereich Umwelttechnologie, Membrantechnologie, Landwirtschaft

Anwendung	2D Materialgruppe
Wasserreinigung	LDH MXene Graphen-Oxid (Krebszellenbehandlung durch Hitze)
Membran	Graphen-Oxid (CO ₂ Abscheidung) MXene (Ionen und Farbstoffe herausfiltern) TMDs (Nanofiltration) h-BN (Trennung Kohlenwasserstoffe) LDHs (Nitrate, Phosphate)
Entsalzung	MOFs Graphen-Oxid
Düngemittel, Pestizide (Nanoagriculture)	Graphen-Oxid (Träger, Slow release) LDHs (Nanoreservoir) MoS ₂
Nanosensoren (Agriculture)	MXene
UV Schutzschicht für Wirkstoffe (Agriculture)	n-BN

Sicherheit und Risiko

In der 2D-Materialforschung hat sich ein eigenes Feld für Safer-by-Design und Nanotoxikologie etabliert. Da viele dieser Materialien (besonders MXene und TMDs) metallhaltig sind, ist ihre Umweltwirkung entscheidend für die industrielle Zulassung.

- 1) Langzeitstabilität von TMDs: oxidierte Formen können Metallionen freisetzen, die in hoher Konzentration toxisch für Wasserorganismen sein können.
- 2) Zellgängigkeit von MXenen: Ein Risiko ist der schnelle Abbau durch Oxidation, was hinsichtlich Umweltverhalten noch unzureichend dokumentiert ist
- 3) h-BN ist biologisch sehr inert, wird aber hinsichtlich Inhalation untersucht, ob Partikel ein kritisches Längen-Breiten Verhältnis haben.

- 4) LDHs werden als am sichersten eingestuft, weil sie aus biokompatiblen Metallen (Mg, Fe) bestehen und in saurem Milieu rückstandslos auflösen; sie gelten als „Green Materials“
- 5) Graphen/N-Graphen werden hinsichtlich Bioakkumulation und der Interaktion mit Zellmembranen untersucht

Nachhaltigkeit

Grüne Synthese von MXenen
Rückgewinnung auf gebrauchten 2D-Katalysatoren
Bio-basierte Linker für MOF statt Erdöl

1.4 Literaturanalyse: Fokus Engineered Living Materials (ELM)

Klassifizierung

ELMs werden grob in zwei Hauptkategorien eingeteilt: biologische ELMs (Bio-ELMs), die ausschließlich aus lebenden Zellen bestehen, und hybride lebende Materialien (HLMs), die lebenden Zellen mit abiotischen Gerüsten kombinieren (Allahbakhsh et al., 2024; Gilbert & Ellis, 2019; Moon & Yum, 2025). Neuere Taxonomien schlagen hierarchische Systeme vor, die Lebenstaxonomien (z. B. Bakterien, Pilze, Pflanzen) mit materialwissenschaftlichen Perspektiven integrieren, was eine systematische Kategorisierung ermöglicht und Forschung leitet (Allahbakhsh et al., 2024; Altin-Yavuzarslan et al., 2024; Gilbert & Ellis, 2019; Rivera-Tarazona et al., 2021). Unterklassifikationen umfassen selbstorganisierende, umweltrelevante und zusammengesetzte ELMs, die jeweils durch ihre Assemblierungsmechanismen und funktionellen Ausgaben definiert sind (Gilbert et al., 2021; Lavrador et al., 2021).

- a. **Bio-ELMs:** Vollständig basierend auf lebenden Zellen (z. B. bakterielle Zellulose-Sphäroide)
- b. **Hybrid Living Materials:** Lebende Zellen eingebettet in abiotische Matrizen (z. B. Hydrogele, Kohlenstoffgerüste)
- c. **Nach Art der lebenden Bestandteile:** Mycellium-, Bakterien, Pflanzen-, Algenbasiert etc. (Richard W. van Nieuwenhoven & Florian Gisinger, 2025a)

- d. **Nach Anwendungsbereichen:** Medizin, Umwelt, Energie, Bauwesen, Robotik (Allahbakhsh et al., 2024; Luo et al., 2023; Moon & Yum, 2025; Muñoz-Guamuro et al., 2024)
- e. **Nach Funktionalitäten:** selbstheilend, selbst-organisierend, reaktionsfähig auf Umwelteinflüsse etc. (Gilbert et al., 2021; Lavrador et al., 2021; Richard W. van Nieuwenhoven & Florian Gisinger, 2025b)

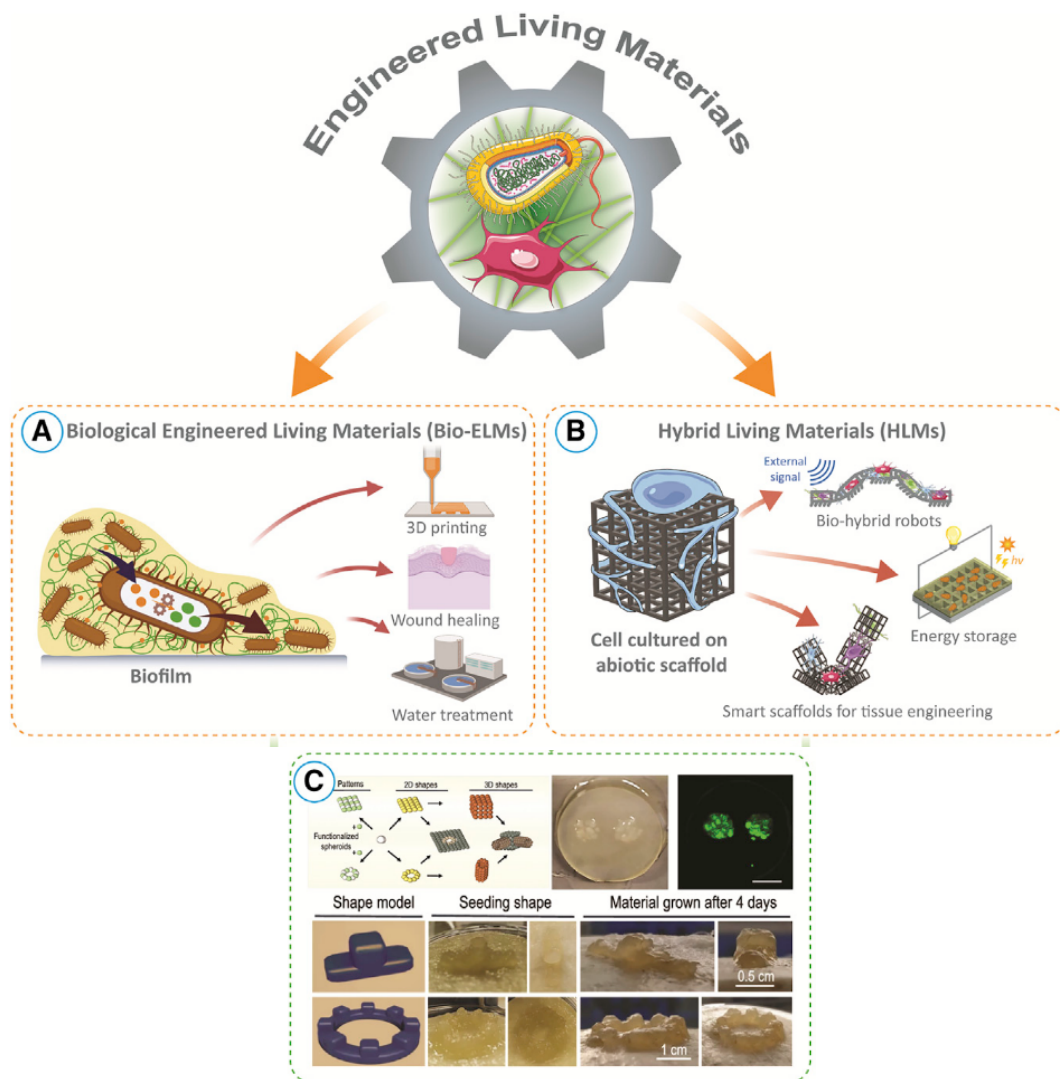


Abbildung 17. Aufbau und Beispiele für Biologische ELMs und Hybrid Living Materials. Bearbeitet von (Lantada et al., 2022).

State-of-the-Art Manufacturing Methods

Die Herstellung von ELMs wird hauptsächlich in zwei Ansätze unterteilt: sowohl von unten nach oben (biologische Selbstassemblierung) als auch von oben nach unten (Integration mit synthetischen Matrizen) (Gilbert & Ellis, 2019; Kang et al., 2021; Omer et al., 2022; Sugianto et al., 2023). Die Matrix muss die lebenden Zellen unterstützen, sie aber auf die Anwendungsstelle beschränken, während sie Überlebens- und Stoffwechselfunktionen lebender Organismen ermöglicht. Die Europäische Kommission hat bereits 2021 in der Ausschreibung der Pathfinder Challenge (Commission, 2021) auf folgende Unterscheidung von Herstellungsverfahren hingewiesen:

Bottom-up (biologische ELMs): Lebende Zellen produzieren und erhalten ihre Matrix selbst (z. B. Biofilme)

Top-down (hybride lebende Materialien HLM): Lebende Zellen, die von einer nicht lebenden Matrix umschlossen sind

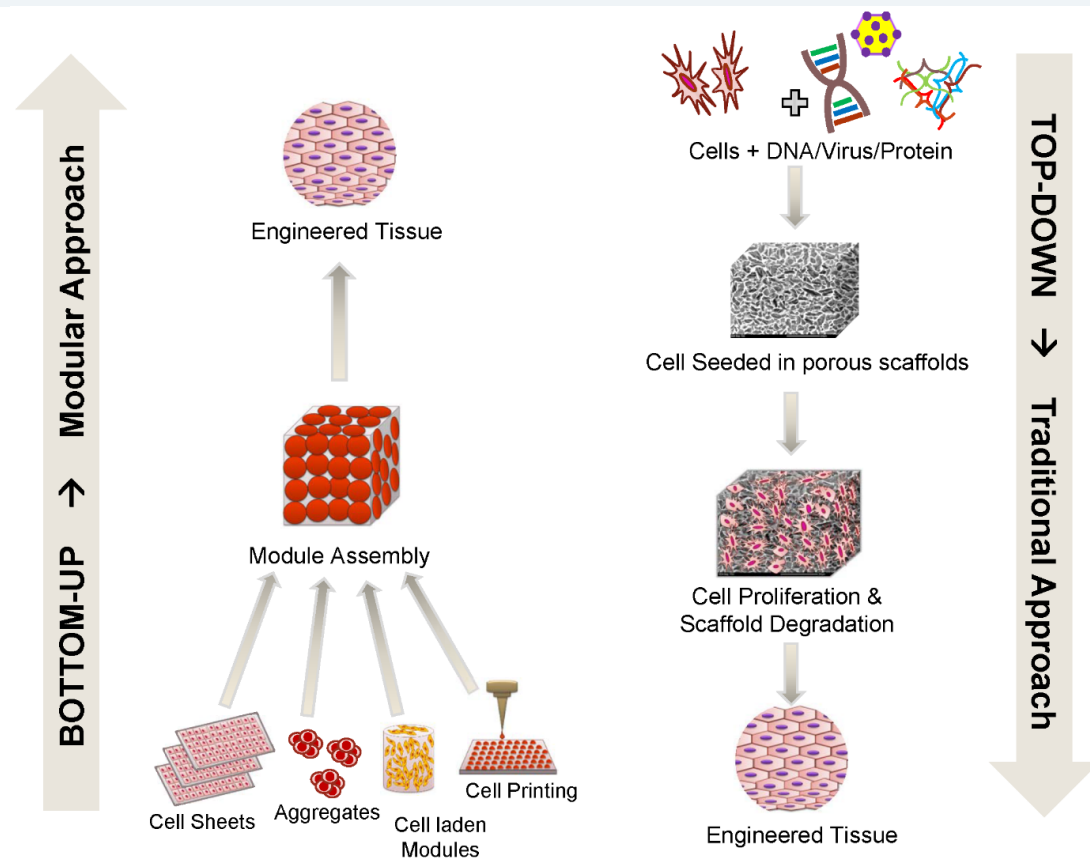


Abbildung 18. Illustration eines Bottom-Up (links) und eines Top-Down (rechts) Verfahrens zur Herstellung von ELMs. (Tiruvannamalai-Annamalai et al., 2014)

Wichtige Verfahren für Engineered Living Materials beinhalten folgende Technologien und Methoden:

- 1) **Additive Fertigung:** Vat-Photopolymerisation und extrusionsbasierte Verfahren für skalierbare, abstimmbare ELMs (Kang et al., 2021; Sun & Guo, 2019). Als spezielle Technik sind 3D-Bioprinting und 4D-Printing für die Herstellung von ELMs von großer Bedeutung, da sie eine räumliche Strukturierung und programmierbare Formänderungen als Reaktion auf Reize ermöglichen (Jo & Sim, 2022; Kang et al., 2021; Lantada et al., 2022; Sugianto et al., 2023).
- 2) **Hydrogel-Verkapselung:** Hydrogele dienen als biokompatible Matrizen für die Zellimmobilisierung und unterstützen Anwendungen in den Bereichen Biosensorik, Arzneimittelabgabe und Gewebeengineering (Dai et al., 2021; Miserez et al., 2023; Rivera-Tarazona et al., 2021; Sun & Guo, 2019; Wang et al., 2025).
- 3) **Biofilm-Engineering:** Nutzt genetisch programmierbare Biofilme für Selbstheilungs-, Sensor- und Anpassungsfunktionen (Gilbert et al., 2021; Lavrador et al., 2021).
- 4) **Teil von Verbund- und Hybridmaterialien:** Integration lebender Zellen mit Kohlenstoff-, Graphen- oder Polymergerüsten zur Verbesserung der mechanischen und funktionellen Eigenschaften (Kang et al., 2021; Liu et al., 2022; Moon & Yum, 2025; Wang et al., 2022).

Anwendungen von Engineered Living Materials

ELMs machen Fortschritte in Biosensing, Wundheilung, Arzneimittelabgabe, Gewebetechnik und lebenden Therapeutiken (Dai et al., 2021; Gilbert et al., 2021; Guimarães et al., 2022; McBee et al., 2022; Phintha & Chaiyen, 2022; Rivera-Tarazona et al., 2021; Rodrigo-Navarro et al., 2021). Konstruierte Bakterien und Säugetierzellen werden für gezielte Therapien, regenerative Medizin und intelligente Implantate eingesetzt (Guimarães et al., 2022; McBee et al., 2022; Phintha & Chaiyen, 2022). Hydrogele und Biofilme ermöglichen eine programmierbare, responsive und langfristige therapeutische Bereitstellung (Dai et al., 2021; Intemann et al., 2025; Rivera-Tarazona et al., 2021).

ELMs werden für Bioremediation, Umweltverschmutzungssensorik, grüne Energieerzeugung und nachhaltiges Bauen eingesetzt (Alakpa, 2021; An et al., 2022; Dong et al., 2025; Lavrador et al., 2021; Srubar, 2021; Tang et al., 2021; Wang et al., 2022) . Pilz- und bakterielle Verbundstoffe werden für selbstheilende Baumaterialien, den Abbau von Schadstoffen und die Kohlenstoffabscheidung verwendet (Dong et al., 2025; Muñoz-Guamuro et al., 2024) (Alakpa, 2021; Kelvin Edem, 2024; Srubar, 2021) . Photosynthetische ELMs (z. B. auf Mikroalgenbasis) bieten nachhaltige Lösungen für Energie- und Umweltüberwachung (Palmett-Plata, 2019; Tang et al., 2021).

Neue Anwendungen umfassen intelligente Textilien, weiche Robotik, Bioelektronik und Landwirtschaft (Allahbakhsh et al., 2024; Lavrador et al., 2021; Moon & Yum, 2025; Wang et al., 2022). ELMs werden für adaptive Verpackungen, tragbare Sensoren und programmierbare pflanzenbasierte Materialien erforscht (Lavrador et al., 2021; Miserez et al., 2023).

Tabelle 8. Auflistung der Anwendungen von Engineered Living Materials im Medizin- und Umweltbereich sowie für weitere Anwendungen. Die Ergebnisse aus der Literatur wurden durch Inhalte aus den Expert:innen-Interviews ergänzt.

Medizinische Anwendungen	Anwendungen im Umweltbereich	Weitere Anwendungen
Biosensoren	biologische Dekontaminierung	intelligente Textilien
Wundheilung	Erkennung von Umweltverschmutzung	Soft-Robotik
(Langzeit) Arzneimittelabgabe (drug delivery)	Erzeugung grüner Energie	(adaptive) Verpackungen
Gewebetechnik, regenerative Medizin	Nachhaltiges Bauen	tragbare Sensoren
lebende Therapeutika	Kohlenstoffabscheidung	Künstliches Fleisch/Fisch
Smarte Implantate	Energie- und Umweltüberwachung (z. B. Photosynthetische ELMs auf Mikroalgenbasis)	Gebäudeoberflächenbehandlung, -beschichtungen
Bioprinting on chip	Kompositmaterialien (z.B. für Straßenbau)	Faser-verstärkte, tragende Elemente
Impfstoffe	-	Leichtbauelemente für Mobilitätssektor (z.B. Innenausstattung Flugzeug)
-	-	Herstellung von Aminosäuren

Sicherheit und Risiko von ELMs

ELMs bergen inhärente Sicherheitsbedenken, da sie aus lebenden, häufig genetisch modifizierten Organismen bestehen. Zudem können bestimmte verwendete Zelltypen spontane genetische Veränderungen durchlaufen und dadurch neue Varianten oder funktionell veränderte Stämme hervorbringen. Zum einen besteht das Risiko, dass solche Organismen bei einem Versagen oder einer Beschädigung der Trägerstruktur in die Umwelt freigesetzt werden; zum anderen können sie auch ohne unmittelbare Freisetzung in vielfältiger Weise mit ihrer Umgebung interagieren. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Strategien entwickelt, um potenzielle Biosicherheits- und Biosecurity-Risiken zu minimieren oder zu umgehen. (An et al.; Rodrigo-Navarro et al., 2021)

Konzepte wie Safe-by-Design und Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD) sind unter Forschenden zu ELMs noch nicht sehr bekannt und werden dementsprechend auch noch nicht großflächig umgesetzt. In den Expert:innen-Interviews wurde der Wissensstand zu SSbD dementsprechend sehr gering eingeschätzt. Es ist damit zu rechnen, dass durch die vermehrte Zusammenarbeit in interdisziplinären Projekten bald auch für ELMs SSbD und ähnliche Ansätze aus verwandten Wissenschaften wie Chemie und Materialwissenschaften übernommen werden. Ein Beispiel hierfür ist das EU-Projekt REMEDY (vgl. Kapitel 4.3), das lebende mikrobielle Tinten entwickelt, die selbstregenerierende Biofilme auf Gebäudeflächen bilden sollen. Parallel dazu wird untersucht, wie der ursprünglich für Chemikalien und Materialien entwickelte SSbD-Rahmen für biointegrierte Systeme angepasst und weiterentwickelt werden kann. (Pajerski, 2025).

Da Safe-by-Design im Bereich der ELM bislang nur vereinzelt adressiert wird, kann man die zugrundeliegende Logik anhand eines Beispiels aus der synthetischen Biologie verdeutlichen (Sundaram et al., 2023). So wurde ein zellbasiertes Biosensorsystem zur Detektion von Arsen für den Feldeinsatz entwickelt, bei dem *Bacillus subtilis* als Chassis diente. In den verwendeten Stamm wurden deaktivierende Mutationen eingeführt, die seine Überlebensfähigkeit in der Umwelt gezielt einschränkten. Die Bakterien wurden auf ein Filterpapier mit Poren kleiner als die Zellen aufgebracht und anschließend mit einem Polycarbonat-Blister abgedeckt, der optisch mit dem Filterpapier verschweißt wurde, um jegliche Leckage auszuschließen. Diese Kammer wiederum wurde in ein robustes Polykarbonatgehäuse integriert. Das zu analysierende Wasser konnte in das Gehäuse eindringen, das sich anschließend selbständig wieder verschloss und so sowohl die Bakterien als auch potentiell kontaminiertes Wasser vollständig einschloss. Darüber hinaus wurde der Schmelzpunkt des verwendeten Kunststoffes so gewählt, dass er

oberhalb der Inaktivierungstemperatur des eingesetzten bakteriellen Stamms liegt. Obwohl dieses Gerät kein Beispiel für ein ELM darstellt, zeigt es, wie ein Safe-by-Design-Ansatz in einem synthetischen Biologieprojekt umgesetzt werden kann – ein Aspekt, der aufgrund ähnlicher Biosicherheitsanforderungen auch für ELMs von hoher Relevanz ist.

Im Folgenden werden Beispiele aus der synthetischen Biologie vorgestellt, die zeigen, wie die Sicherheit genetisch veränderter Organismen gewährleistet werden kann. (Rodrigo-Navarro et al., 2021)

- 1) Ein Ansatz besteht darin, Organismen genetisch so zu verändern, dass sie außerhalb kontrollierter Bedingungen nicht überlebensfähig sind. Dies kann beispielsweise erreicht werden, indem man sie von einer spezifischen, extern zugeführten Substanz abhängig macht (Auxotrophie).
- 2) Ein weiterer Ansatz ist die Konstruktion von Zellen, die sich selbst zerstören, sobald ein bestimmtes Umweltsignal detektiert wird. So kann etwa durch einen chemischen Auslöser die Expression von Nukleasen induziert werden, die das bakterielle Genom abbauen und zum Zelltod führen.
- 3) Darüber hinaus existieren Strategien, bei denen das Überleben direkt an die Kontrolle essentieller Gene gekoppelt wird. Hierbei können Transkription, Translation, Proteinstabilität oder Enzymaktivität so reguliert werden, dass das Wachstum der Zellen nur unter bestimmten Bedingungen oder in Anwesenheit definierter Moleküle möglich ist.

Neben diesen synthetisch-biologischen Strategien existieren auch Ansätze, die nicht auf genetischen Modifikationen beruhen. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung physikalischer Barrieren, etwa durch hochvernetzte Polymere als abiotische Matrizen. Sind die Porengrößen der Matrix kleiner als die lebenden Zellen, können diese die Struktur nicht verlassen, solange die Matrix intakt bleibt. Eine andere Möglichkeit ist es, die Zellen kovalent an die Matrix zu binden, was ihre Mobilität weiter einschränkt. Dabei muss aber eine mögliche Degradation des Wirtsmaterials berücksichtigt werden. Um dieses Risiko zu adressieren, wird derzeit erforscht, inwieweit biozide Komponenten in die Matrix integriert werden können, die im Fall einer strukturellen Schädigung freigesetzt werden und die eingebetteten Zellen zuverlässig abtöten, beispielsweise durch die Freisetzung von Antibiotika.

Darüber hinaus können Engineered Living Materials Nanomaterialien enthalten oder diese sogar selbst erzeugen. Dennoch werden bislang kaum sicherheitsbezogene Fragestellungen adressiert, die sich spezifisch aus der Kombination von ELMs und Nanomaterialien ergeben (Allahbakhsh et al., 2024; Lantada et al., 2022). Trotzdem sind ähnliche Herausforderungen bereits aus anderen Bereichen bekannt, etwa bei funktionalen oder „smarten“ Materialien. (Foss Hansen, 2022) So gilt die Risikobewertung von Polymeren seit Langem als anspruchsvoll, insbesondere weil ihre Eigenschaften stark von Additiven, Verarbeitungsschritten und potentiellen Abbauprodukten abhängen. Dies wird weiter erschwert, wenn Polymere mit zusätzlichen Materialien — beispielsweise Nanomaterialien — verstärkt werden. Auch Nanomaterialien selbst stellen Regulierungsbehörden vor erhebliche Herausforderungen, da ihr Verhalten stark kontextabhängig ist und verlässliche Daten häufig fehlen. Gleichzeitig müssen Regulierungsansätze so gestaltet sein, dass sie notwendige Sicherheitsmechanismen gewährleisten, ohne technologische Innovationen zu behindern.

Ein ähnliches Spannungsfeld zeigte sich auch in unserem Stakeholder-Workshop (siehe Kapitel 2.2). Die Teilnehmenden betonten einerseits deutlich die Notwendigkeit, regulatorische Anforderungen nicht weiter zu verkomplizieren und Überregulierung zu vermeiden, um Innovationen im Bereich der ELM nicht frühzeitig auszubremsen.

Gleichzeitig wurden in den vertiefenden Expert:innen-Interviews eine Reihe grundlegender Unsicherheiten hervorgehoben, die den Bedarf an klaren Leitlinien unterstreichen. Dazu zählen unzureichend charakterisierte biologische Ausgangsmaterialien, begrenztes Wissen über potentielle Exposition gegenüber eingebetteten oder freigesetzten Stoffen sowie die generelle Schwierigkeit, das Verhalten und die ökologische Wirkung von Mikroorganismen in komplexen natürlichen Umgebungen vorherzusagen. Besonders betont wurde das Risiko unkontrollierter ökologischer Störungen durch genetisch veränderte Organismen. Zudem zeigte sich, dass im Bereich biobasierter Materialien weiterhin zahlreiche Fehlannahmen über Sicherheit und Nachhaltigkeit bestehen, die zu Fehleinschätzungen und damit verbundenen Risiken führen können.

Nachhaltigkeit

Nachdem verschiedene Ansätze zur Adressierung der Biosicherheit, wie integrierte genetische Sicherheitsmechanismen (kill-switches) oder physikalische Barrieren

betrachtet wurden (siehe oben), stellt sich anschließend die Frage nach der Nachhaltigkeit.

ELMs stellen nach wie vor eine sehr junge Technologie dar, was sich unter anderem daran zeigt, dass sie bislang überwiegend im Rahmen von Labordemonstratoren entwickelt werden (vgl. auch die entsprechende Pathfinder-Ausschreibung der Europäischen Kommission, siehe Kapitel 4.3 und unsere Ergebnisse aus den Expert:innen-Interviews). Nach unserem Kenntnisstand liegen bislang kaum fundierte Untersuchungen vor, die die häufig postulierte ökologische Nachhaltigkeit von ELMs systematisch bewerten. Hinzu kommt, dass klassische Lebenszyklusanalysen für lebende, sich verändernde Materialien nur bedingt geeignet sind und daher methodische Anpassungen erforderlich machen.

Vor diesem Hintergrund zeigt eine kürzlich veröffentlichte Arbeit exemplarisch, wie komplex die Frage der Nachhaltigkeit bei ELMs tatsächlich ist: ELMs kommen als nachhaltige Baumaterialien nur dann in Frage, wenn sie ausreichende Steifigkeit und Tragfähigkeit entwickeln. Die dafür notwendigen strukturellen Verstärkungen könnten jedoch zugleich negative Auswirkungen auf die ökologische Bilanz haben – etwa durch höheren Materialbedarf oder ein größeres Abfallaufkommen. (Heveran & Hernandez, 2023) Dieses Beispiel verdeutlicht, dass funktionale Verbesserungen und Nachhaltigkeitsziele durchaus in Konflikt stehen können. Insgesamt wird deutlich, dass mit zunehmender technologischer Reife ein deutlich systematischerer Umgang mit Nachhaltigkeitsaspekten erforderlich sein wird, um zu vermeiden, dass die reine „Lebendigkeit“ eines Materials als Garant für ökologische Vorteile interpretiert wird.

Die Haupte Erkenntnisse aus der bibliographischen Analyse sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9. Zusammenfassung der Hauptkenntnisse aus der Literaturrecherche zu Engineered Living Materials.

Aussage	Begründung	Quellen
ELMs ermöglichen selbstheilende, adaptive und programmierbare Materialien	Mehrere experimentelle Studien und verschiedene Testmethoden belegen diese Eigenschaften in diversen Anwendungen.	(Rodrigo-Navarro et al., 2021) (An et al.) (nanomaterials) (Allahbakhsh et al.) (Rivera-Tarazona et al.) (nanomaterials) (Altin-Yavuzarslan et al.) (Gilbert et al.)
3D & 4D-Druck sowie Hydrogel-Verkapselung sind relevante Herstellungsmethoden	Methoden sind bereits weit verbreitet und ermöglichen räumliche Steuerung und funktionale Integration in die Materialien.	(Lantada et al., 2022; Rivera-Tarazona et al.) (Kang et al.) (Commission) (Sugianto et al.) (nanomaterials) (nanomaterials)
ELMs sind ökologisch nachhaltiger als viele herkömmliche Materialien	In vielen Fällen biologische Abbaubarkeit, Selbstregeneration und reduzierter Ressourcenverbrauch reduzieren Wartung, jedoch begrenzte Lebenszyklusdaten.	(An et al.) (Wang et al.) (Kelvin Edem) (Ebbesen et al.)
Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit und Regularien sind groß	Es bestehen Bedenken hinsichtlich der Freisetzung von GVO und Nanotoxizität. Erste Ergebnisse zur öffentlichen Akzeptanz sind dokumentiert, soziale Barrieren aber noch nicht vollständig geregelt.	(Dai et al.) (Heveran et al.) (Moon & Yum) (Ebbesen et al.)
Anwendungen im Bereich Medizin und Umwelt sind am weitesten fortgeschritten	Zahlreiche Studien und Übersichtsarbeiten zeigen Fortschritte in diesen Bereichen auf, der großflächige Einsatz ist aber noch begrenzt.	(nanomaterials) (Rivera-Tarazona et al.) (nanomaterials) (Kang et al.) (Wang et al.) (Intemann et al.) (Guimarães et al.) (Dong et al.)
Die Umsetzung von SSbD beginnt erst/ist noch wenig bekannt	Frühe Übernahme in die EU-Politik, aber praktische Integration und globale Harmonisierung sind erst im Gange.	(Heveran et al.) (Ebbesen et al.)

2 Expert:innen-Interviews

Eine weitere Informationsquelle für die beiden Materialgruppen waren Expert:innen-Interviews. Der Interview-Leitfaden mit 18 Fragen zu den beiden Materialgruppen ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Fragen des Interviews waren nach acht Themenbereichen gegliedert: Einleitung, AdMa (=Advanced Materials), 2D/2d+ Hybridmaterialien/ELM, Sicherheit & Nachhaltigkeit, Möglichkeiten, Herausforderungen, Ausblick und Abschluss.

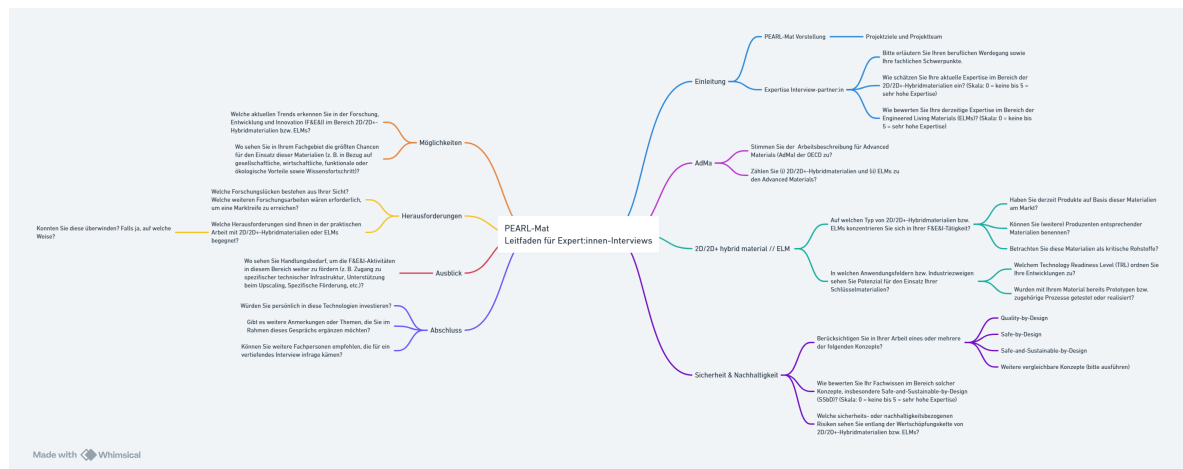


Abbildung 19. Interview-Guideline für die Expert:inneninterviews.

Advanced Materials Definition laut OECD

Zu Beginn wurden die Expert:innen nach ihrer Meinung zur aktuellen Arbeitsbeschreibung für Advanced Materials (AdMa) der OECD befragt:

- „AdMa sind Materialien, die gezielt entwickelt wurden, um
- neue oder verbesserte Eigenschaften und/oder
- spezifische oder verbesserte strukturelle Merkmale
- mit dem Ziel einer verbesserten funktionalen Leistung zu erzielen.
- Dazu zählen sowohl neuartige, hergestellte Materialien als auch modifizierte traditionelle Materialien. Berücksichtigt werden ebenso Materialien, die mittels innovativer Herstellungsverfahren – etwa Bottom-up-Ansätzen – spezifische Strukturen aus Ausgangsstoffen erzeugen. Es wird anerkannt, dass sich die Definition von AdMa im Zeitverlauf weiterentwickeln wird.“

Der Großteil der ELM und 100% der 2DH Befragten stimmen der Definition zu, jedoch wurde sie prinzipiell als sehr breit und eher allgemein bewertet. Es wurden ein paar Anmerkungen genannt, welche Abänderung bzw. Verfeinerung des Wortlautes möglich wären. Dies umfasst etwa die Unterscheidung zwischen Low- und High-Tech, da AdMa typischerweise High-Tech-Prozesse erfordern. Außerdem sollte die Funktion der Materialien stärker hervorgehoben werden. Bezüglich ELMs wäre außerdem eine Unterscheidung zwischen Biorealien und biobasierten Materialien sinnvoll. Ca. $\frac{3}{4}$ der 2DH-Befragten strichen die Wichtigkeit des Zeitfaktors, der in der Definition enthalten ist, als einen der essentiellsten Merkmale heraus. Jedoch wurde der von einigen auch wegen einer fehlenden Zeitangabe als unzureichend empfunden, da „advanced“ auch „neu“ suggeriere. Die Frage sei, ob z.B. Graphen 20 Jahre nach seiner Entdeckung noch als „neues“ Material klassifiziert werden soll. Nützlicher wurde eine Klassifizierung in Materialklassen in spezifische 2D mit konkreten Zieleigenschaften empfunden zusammen mit einem expliziten Validierungsprotokoll. Ob die Definition über die Herstellung nötig oder essentiell ist, darüber gehen die Meinungen der 2DH Expert:innen oft diametral auseinander.

Alle 2DH Interviewpartner reihten 2D als Advanced Material ein, besonders betont wird das für alle Hybridvarianten, bei Engineered Living Materials tun dies 89%.

Auf die Frage, ob Engineered Living Materials als kritische Rohstoffe betrachtet werden, antworteten 57% der Befragten „Nein“, wobei die genaue Definition dieser Bezeichnung nicht weitläufig bekannt war. Drei ELM Expert:innen regten zudem an, dass ethische Aspekte für medizinische und lebensmittelbezogene Anwendungen relevant sind, dass ELMs Potential im Ernährungssektor haben und dies jedenfalls als kritisch gelten würde und dass ELMs außerdem möglicherweise andere Materialien ersetzen könnten, die aktuell als kritisch gelten.

2DH Expert:innen sehen mehrheitlich 2D Materialien nicht als kritischen Rohstoff an, sondern vielmehr als Möglichkeit ebensolche zu ersetzen. Ein Experte sieht das differenzierter und verweist unter anderem auf die globale Verfügbarkeit der Übergangsmetalle wie Titan, die im Critical Raw Materials ACT der EU gelistet sind.

2.1 Engineered Living Materials Expert:innen

Insgesamt wurden 33 Expert:innen für ein Interview angefragt und letztendlich 11 Expert:innen interviewt, davon 2 über eine online Befragung und 9 Personen im Dialog. Die Interviewpartner:innen waren Vertreter:innen von Universitäten, Forschungszentren, Industrie und Start-Ups. Dabei deckten die Expert:innen folgende Sektoren und Bereiche ab, was die große Vielfalt in Bezug auf Forschung und Anwendungen von Engineered Living Materials unterstreicht: Medizin, Biobasierte Materialien, Architektur, Biologie, Materialwissenschaften, Pharmazie, Chemie, Verfahrenstechnik, Simulation Bioreaktoren. In Tabelle 10 sind die Expert:innen der Interviews genannt mit ihrer zugehörigen Institution und ihrer entsprechenden Rolle bzw. Position.

Tabelle 10. Expert:innen, die an den Interviews zu Engineered Living Materials teilgenommen haben.

Institution	Name	Role/Position
Universität des Saarlandes	Aránzazu del Campo	Professur für Materialsynthese und Werkstoffentwicklung
InnoRenew Centre of Excellenc	Anna Sandak	Stellvertretende Direktorin und Leiterin der Forschungsabteilung - Materials
SimVantage	Christian Witz	CEO
TU Graz Institut für Chemie und Technologie Biobasierter Systeme	Karin Stana Kleinschek	Professorin für Chemical technology of bio-based systems
TU Graz Institut für Chemie und Technologie Biobasierter Systeme	Rupert Kargl	Professor für Materialwissenschaften Bioorganischer Stoffe
RCPE	Carolín Tetyczka	Materials Unit, Researcher
BioPrint	Michael Außerlechner	Professor für 3D Nachbildung von gesundem Gewebe und Tumorgewebe durch High-End 3D Biodruck und Nanodruck
TU Delft	Kunal Masania	Associate Professor
MedUni Graz	Sebastian Schwaminger	Professor, Head of Nanolab Graz
TU Graz Institut für Architektur und Medien	Julian Jauk	Scientific Researcher
TU Graz Institut für Architektur und Medien	Hana Vasatko	Scientific Researcher

Anwendungen von Engineered Living Materials

Die vielfältigen Anwendungen von ELMs sind in Tabelle 11 gezeigt mit den Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkten der Expert:innen. Im Wesentlichen spiegeln die betreffenden Sektoren die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche wider (siehe auch Kapitel 4.4 in der Trendanalyse), jedoch wurden weitere spezifische Anwendungen für ELMs identifiziert.

Tabelle 11. Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der ELM Expert:innen sowie die Sektoren der möglichen Anwendungen dieser.

Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit	Mögliche Anwendung, relevanter Sektor
Therapeutische Materialien für Engineered Living	Health & Medical
3D-Druck von Mischungen für Baumaterialien (Lehm, Sägemehl) als Wirtsmaterial für Myzel, das als Faserverstärkung dient	a) Bauwesen b) Weitere tragende Elemente
Modifizierbare Bakterien und Gerüste für zelluläres Wachstum	a) Ernährung (z. B. künstliches Fleisch) b) Regenerative Medizin (Hautheilung, Mikrobiom) c) Medikamentenabgabe
Anfragen zu Simulationsprojekten für Zellwachstum	a) Lebensmittelsektor b) Aminosäuren c) Verpackungsmaterial d) medizinischer Sektor
a) Beschichtungen für lebende Haut (Projekt ArchiSkin) b) lebende Tinten: auf Baumaterialien mit unterschiedlichen Funktionen aufgetragen (Pathfinder) c) Verbundwerkstoffe für Straßen (LiveMat)	a) Bau- und Bausektor b) Gesundheitsaspekte, Medizinprodukte c) Sensorik, Überwachung
a) Grundlagenforschung: lebende Organismen und ihre einzigartigen Eigenschaften nutzen: Selbstheilung, Selbstwahrnehmung, Selbstanpassung – als Teil der Anwendung b) Angewandte Forschung: biogene Materialien, die von lebenden Organismen hergestellt werden, aber vor der Anwendung abgetötet werden (Materialien inert)	a) Mobilität (Innenausstattung) b) Baumaterialien nicht-tragend c) Beschichtungen d) Verpackung
a) menschliches Gewebe: Haut, Leber, Mesotel, Tumor	a) Health & Medical b) Pharmazeutika

b) Bioprint on Chip

c) Kosmetik

d) Toxikologie (für Tests)

e) Kompatibilitätstests

a) Zellulosefasern, Nanocellulose

b) Polysaccharid-Hydrogele

Health & Medical

Die TRL (Technology Readiness Level) der verschiedenen ELM-Entwicklungen der Befragten fielen unterschiedlich aus: die meisten liegen bei TRL3-4 und 5-6, wenige sind bei hohem TRL angesiedelt. Folgende Prototypen wurden von den Interviewpartner:innen genannt:

- Beschichtungen von Gebäuden
- Prototypen mit Hefe zum Brauen
- Simulationen für Bioreaktorprozesse
- Innenstrukturen für Flugzeuge
- Blutgefäßmodelle

Auch wenn die meisten der Befragten aus der Forschung kamen und selbst keine Materialien am Markt hatten, konnten verschiedene Produkte und Hersteller von ELMs benannt werden, siehe Tabelle 12. Aus der Lebensmittelbranche wurden weitere Hersteller genannt: Vow, Umami Bioworks, Avant Meats, Cubiq Foods, Gourmeyer, Aleph Farms, Integrity Culture, JBS. Auch in parallelen Lebensmittelmärkten wie der Präzisionsfermentation sind viele Hersteller bekannt: Perfect Day, The EVERY Company, Impossible Foods, Motif FoodWorks, Geltor, Imagindairy, Formo, Change Foods, Helaina, Eden Brew, Onego Bio.

Tabelle 12. Produzenten von Engineered Living Materials und Materialien am Markt.

Produzenten von ELMs	Materialien am Markt
a) Mysulation (NL, Isolationspanele)	nur für Mischungen aus Holz/Pflanzenfaser & Myzel (ohne Ton und nicht 3D-gedruckt) für die Anwendung in Akustikpaneelen, Heizdämmung
b) Mycolutions (DE, Panele für thermische und akustische Isolation)	
c) Myceen (EE, Akustikpanele)	
Ferring Pharmaceuticals	Materialien für die vaginale Behandlung

a) mosa meat (Künstliches Fleisch)	
b) Sea Growth (Fish, Island)	Verschiedene Produkte am Lebensmittelmarkt
c) food brewer (Kakao, Kaffee, Schweiz)	
a) Xyhlo: Niederländische Firma 1. Generation lebender Beschichtung (Pilze),	
b) Basilisk: Niederländischer Betonproduzent, selbstheilender Beton	Lebensmaterialien für den Bausektor: Beschichtungen, selbstheilender Beton
a) Ecovative (pilzbasierte Materialien)	
b) grown.bio (Pilze)	
c) Modern synthesis, UK (Zellulosebasierte Materialien)	Pilz- und zellulosebasierte Materialien
a) Epiderm: Skin-Models;	
b) BiomimiX: fluidic Chip-Gerät;	
c) TissUse: Leberchip	Hautmodelle, fluidic Chip Device, Leberchip
a) Cellink: 3D Drucker	
b) Lohmann&Rauscher: Wundpflaster	
c) Johnson&Johnson: Zellulose-Gefäßtransplantat	Drucker für Bioprinting; Anwendungen der Wundheilung
d) Matriderm: Wundheilung	

ELM Chancen und Forschungslücken

Je nach Anwendung und entsprechendem Sektor wurden die Chancen und spezifischen Stärken von ELMs sehr unterschiedlich eingeschätzt. Als klarer Vorteil wurden Punkte der ökologischen Nachhaltigkeit genannt: mögliche Einsparung von CO₂-Emissionen, Nutzung lokal verfügbarer Materialien, die luftreinigenden Eigenschaften mancher ELMs und die Möglichkeit zur Zirkularität und der biologischen Abbaubarkeit der Materialien. In Hinblick auf ökonomische Vorteile wurde auf das große Potential der Materialgruppe im Gesundheitssektor, die reduzierten Wartungskosten durch regenerative Eigenschaften und den Vorteil in Bezug auf keine Abhängigkeit von kritischen Ressourcen hingewiesen. Auch soziale und ethische Gesichtspunkte wurden genannt: die regenerative Medizin würde Alternativen zu Gewebe- und Organ Spendern liefern, Tierversuchsanlagen könnten ersetzt werden und dadurch die soziale Akzeptanz gewisser Produkte erhöht werden.

Die Expert:innen wurden zudem nach aktuellen Forschungslücken und Herausforderungen in der Arbeit mit ELMs befragt. Die gesammelten Antworten konnten in drei Kategorien eingeteilt werden: technisch, systemisch und Material-intrinsisch. Tabelle 13 fasst die verschiedenen Barrieren zusammen, die für Marktreife mancher Entwicklung noch überwunden werden müssten.

Tabelle 13. Technische, systemische und Material-intrinsische Barrieren, denen Engineered Living Materials aktuell noch gegenüberstehen.

Technische Barrieren	Systemische Barrieren	Material-intrinsische Barrieren
Fehlende Materialkennzahlen (z.B. für 3D Druck, Konstruktion etc.)	Mangel an Investitionen	Sicherheitsproblematik (genetische veränderte Materialien)
Skalierbarkeit	Wenig etablierte Märkte	Umgang mit dynamischen Eigenschaften
Verbindung digitaler Werkzeuge mit Produktionsprozessen	Soziale Akzeptanz im Ernährungsbereich	Beständigkeit gegen UV-Licht
Digitalisierung/Simulation biologischer Materie	Komplexität des interdisziplinären Forschungsfeldes	Beständigkeit gegen Feuchtigkeit
Steuerung von Funktionalität/Leistung	Preisdruck von Benchmark-Materialien	Ökologische Langzeitauswirkungen unklar
Oft sterile Bedingungen erforderlich	Mangel an qualifiziertem Personal	oft fehlende Reproduzierbarkeit; Literaturdaten nicht robust

Es wurden auch erste Strategien zum Umgang mit den genannten Herausforderungen berichtet. Ein möglichst genaues Verständnis der Dynamik und der Wachstumsmechanismen der Lebendkomponente in ELMs etwa ist essentiell zur Einstellung gewünschter Materialeigenschaften. In Bezug auf fehlende Digitalisierung und Simulation biologischer Materie wurde auf innovative hybride Modelle verwiesen, welche eine Balance zwischen Rechenzeit und Genauigkeit erzielen könnten. Um den verschiedenen Herausforderungen in diesem hoch interdisziplinären Feld zu begegnen, wurde das Arbeiten in multi-disziplinären Teams und gezielte Trainings und Schulungen empfohlen.

2.2 2DH Materialien Expert:innen

Es wurden 12 Expert:innen zu 2DH befragt, 2 davon aus der Industrie, 5 aus dem Ausland. Eine Vertreterin leitet das schwedische 2D Netzwerk SIO-Graphene. Die Mehrheit der Befragten sind Vertreter der Forschung an Universitäten oder Forschungszentren.

Tabelle 14: Interviewteilnehmer der 2D Material Expert:innen

Institution	Name	Rolle/Position
TU Wien	Bernhard Christian Bayer-Skoff	Assistenzprofessor, PI ERC CoG & Junior Research Group Leader Institut für Materialchemie
TU Wien	Carsten Gachot	Univ. Prof., Leiter Forschungsbereich Tribologie, Institut für Konstruktionswissenschaften
MIBA Gleitlager	Georg Leonardelli	Gruppenleiter Beschichtung, Technology Competence Center
University of Birmingham	Iseult Lynch	Professor, Chair in Environmental Nanoscience School of Geography, Earth and Environmental Sciences
SKF	Claes Olsson	R&D Operations, SKF Technology
Universität des Saarlandes	Volker Presser	Full Professor, Department Leader INM – Leibnitz Institute for New Materials
AC2T research GmbH	Marko Piljevic	Doktorand, MXene Synthese
AC2T research GmbH	Manel Rodriguez	Area Leiter
Universidad de Chile	Andreas Rosenkranz	Assistenzprofessor Department Ingenieurchemie, Biotechnologie und Materialien, Fakultät Physikalische Wissenschaft & Mathematik
SIO Grafen	Elisabeth Sagström-Bäck	Programmcchef SIO Grafen Outreach Swedish Chips Competence Centre Chalmers Industrieteknik
Atominstitut TU Wien	Sarah Skoff	Arbeitsgruppenleiterin Festkörper-Quantenoptik
Danubia Nanotech	Viera Skakalova	Start up, CEO, Slowakei
TU Wien	Markus Valtiner	Univ. Prof., Institutsleiter Angewandte Physik

Die **Selbsteinschätzung zu 2DH Materialien** wurde von Forschungsmitarbeitenden mehrheitlich mit 5, teils mit 3-4 angegeben. Industrievertreter schätzten sich mit 3 ein, eingeschränkt auf jene 2D Materialien mit denen sie schon Kontakt hatten. Es ist innerhalb der befragten Gruppe ein Genderaspekt in der Selbsteinschätzung festzustellen.

Bis auf eine Ausnahme war allen Beteiligten der Begriff SSbD bekannt. Einen besonders starker Bezug zur Nachhaltigkeit und Gesundheitsaspekten war bei Interviewpartnern aus der Industrie zu bemerken, wie bei Forscher:innen mit einem jahrelangen Fokus auf Toxizitätsaspekte. Generell ist SSbD allen Interviewpartnern ein großes Anliegen. Die **Selbsteinschätzung zu SSbD** Konzepten lag mehrheitlich bei 3. Drei Expert:innen forschen aktiv im Bereich Health und Environmental Effekte sowie Langzeiteffekten und stufen sich selbst aber auch nur bei 3-4 ein. Der Rest sieht die Inkorporation als nicht kritisch an, wegen der großen Flächenausdehnung und damit des großen Aspekt-Ratios von 2D Materialien im Gegensatz zu Nanomaterialien.

Anwendungen der Expert:innen von 2D Materialien

Die Expert:innen gaben an mit ihren Forschungsarbeiten im TRL Bereich 1-4 zu liegen, wobei viele differenziert antworten je nach spezifischer Materialgruppe und Tätigkeit. Arbeiten zu Syntheseprozessen werden mit TRL 1-2 eingestuft, Arbeiten zu Graphenen wurden teils bei TRL 8-9 eingestuft, Funktionale Schichten und deren Performance Charakterisierung liegen bei TRL 3-4.

Lediglich 3 Expert:innen gaben an, an Prototypen zu arbeiten: Batterien (UK, Anderson), Agrovoltaik; Wellenlängenspezifische Solarzellen zur Ermöglichung eines geschlossenen Wasserkreislaufs in Gewächshäusern (UK, Lynch); Bereich der Chipfertigung und Sensoren (AUT, Valtiner). Einige wenige Expert:innen waren wegen Tätigkeiten in Bereichen, die nicht mehr als vorkompetitiv eingeschätzt wurden, nicht in der Lage Details zu ihren Prototypen bzw. dem aktuellen Fokus der Arbeiten zu geben.

Da viele Expert:innen im Bereich der Synthese und Charakterisierung arbeiten, sind die Anwendungsfelder in Tabelle 15 der beforschten 2D Materialgruppen sehr vielfältig.

In Österreich sind aktuell keine Hersteller von 2D Materialien vorhanden. Viele 2DH werden in Laboren hergestellt und unter den Forschenden weltweit innerhalb von Kooperationen geteilt. Kommerzielle Synthese und Vertrieb durch: *Graphinea* (Spanien); *SIGMA Aldrich*, ein Unternehmen, das eine Vielzahl an Chemikalien, Nanomaterialien und Zellkulturen vertreibt. *Carbon Ukraine* (Y-Carbon Ltd.) wird als Standardlieferant für MAX Phasen und MXene genannt. Weiters spezialisieren sich nach Angaben der Expert:innen Beschichtungshersteller zunehmend auf die Herstellung von 2D Materialien, wie *Levidian* und *AIXTRON*. In der Slowakei ist *Danubia Nanotech* auf die Erzeugung von Graphen und Graphen-Oxid spezialisiert.

Tabelle 15: Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der 2DH Expert:innen mit von ihnen genannten möglichen Anwendungsbereichen

2D Materialgruppe	Anwendungsmöglichkeiten
MXene	Verschleißschutz, Festschmierstoff Tiefziehen (Vermeidung Umweltverschmutzung durch Restschmierstoffe) Luft-Raumfahrt (ölfreie Anwendung, mit MAC Ölen)
MXene	Energiespeicher (Superkondensator)
Graphen Derivate	Wasserentsalzung
MXene & Graphen-Oxide	Anodenmaterial Wasserstoffspeicherung
Graphen-Hybride Pnictogene	
Graphen&TiO2	funktionale Beschichtungen (Wasserqualität;
h-BN	EM Abschirmung, Dekontamination)
Graphen& h-BN	Tinten f. thermisches Management Schichten
Hochentropie 2D Materialien (Sulfide)	ultradünner Korrosionsschutz, Energieumwandlung (photokatalytische Wasserstoffproduktion)
h-BN	Quantenanwendungen bei Raumtemperatur, ersetzt Diamant, Magnetsensorik und biologisches Labeling Hochauflösende Temperatursensorik und Magnetfelder von Zellen
N-dotiertes Graphen	Sodium-Ion/Li-Ion Batterien
MOFs	Anoden und Kathodenmaterial
MOFs & Sulfur	Temperatur-, Bewegungssensoren, Glucose Sensor
(high Entropie) MXene	Batterieanwendungen
WS2, TiS2, MoS2	Trockenschmierstoff Lageranwendungen zur Lebensdauersteigerung Weltraumapplikation
Graphene, Graphen-Oxid	Verschleißschutzschicht für Mining Applikationen
Hybride: Ti-Oxid & MXene	Potential für Schichten in stromdurchflossenen Lagern (EV)
Graphen-Oxid	Spray für Reifen, Wasserfilterungsmembranen
MXene	Autarke Solarzellen
MoS2	Nanodüngemittel, Radikalfänger

2DH Trends laut Expert:innen

Die von den Expert:innen angegebenen Trends decken sich mit jenen, die in der Recherche der Roadmaps und bibliographischen Analyse identifiziert wurden. Als volumenmäßig größter Bereich wird die *Batterietechnologie* gesehen, ob für den EV Automotive Bereich oder als gedruckte Variante. Ein großer Trend sind unterschiedlichsten *Hybride aus 2D Materialien*, um gezielt noch mehr Eigenschaften zu kombinieren, die bisher unvereinbar waren, wie beispielsweise hohe Ladungsträgerdichte und extrem geringe thermische Leitfähigkeit. Weitere Trends sind *Twistronic (Moire Strukturen)*, die das gezielte Einstellen von elektronischen Eigenschaften eines chemisch identen Materials zwischen Isolator und Supraleiter ermöglichen. *Funktionale Schichten* werden von einigen Befragten selbst beforscht: (i) Elektromagnetische Abschirmung für Elektronik und Menschen, (ii) Korrosions- oder Verschleißschutz (Tribologie), (iii) Reaktive Schichten, die gesundheitsschädliche Stoffe zersetzen können. Applikationen für *hochauflösende Sensoren* werden von allen Expert:innen als Wachstumsfeld wahrgenommen, wenn auch jeweils in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. *Quantentechnologie* ist nicht nur in der Chipfertigung für höhere Leistungsdichten vertreten, sondern auch im Bereich der hochauflösenden Magnetsensorik.

Genannt werden auch Elektrokatalyse und Photokatalyse und damit verbundene Herstellung von grünem Wasserstoff oder Ammoniak und Entsalzung sowie hochselektive Membranen, jedoch sind Anwendungsgebiete innerhalb der Befragten nur bei einzelnen im Fokus.

Der Trend immer neue Zusammensetzungen zu finden hat sich deutlich verlangsamt. Theoretische Vorhersagen mittels DFT Simulationen müssten laut einiger Expert:innen dennoch intensiviert werden, um nur die vielversprechendsten Elementkombinationen für empirische Tests auszuwählen.

2DH Chancen, Forschungslücken und Barrieren

Alle Interviewpartner gaben an, dass 2DH große Entwicklungschancen haben, aber eine der größten Herausforderungen die **Hochskalierung** auf industriell größere Mengen darstellt bzw. die größeren Mengen mit einer konstanten, vorhersehbaren Qualität herzustellen. Trotz des weiter hohen Bedarfs an Grundlagenforschung zur Synthese und der Charakterisierung der Eigenschaftskombinationen sehen die Expert:innen einen notwendige Abkehr von Rekordeigenschaften im Labor, hin zu reproduzierbaren, industriell herstellbaren, verlässlichen Komponenten.

Barrieren werden von der Industrie und der Forschung teils gänzlich unterschiedlich wahrgenommen. Die Industrie beklagt den hohen Preis, die noch nicht klare Kenntnis der Eigenschaftsverbesserung und die gering verfügbaren Mengen. Die Performancesteigerung ist oftmals nicht so groß wie erhofft bzw. wird von der Industrie als nicht groß genug wahrgenommen. Zudem zögert die Industrie bestehende Prozesse für die Integration von 2D Materialien anzupassen. Es fehlt allerdings auch an ausreichenden Forschungsergebnissen, die sich gezielt mit der Integration in bestehende Fertigungsprozesse beschäftigen. (Im Bereich der Chipfertigung hat das Graphene Flagship dazu einen Schwerpunkt gesetzt.)

Die Forschung sieht fehlende Geldmittel und fehlenden Zugang zu Infrastrukturanlagen, um in die Hochskalierung zu gehen als Barriere. Zudem wird der Zeitaufwand durch empirische Versuchszugänge als Hemmschuh wahrgenommen.

Fehlende bzw. unzureichende **Regulatorien** werden von Forscher:innen unterschiedlich bewertet. Einerseits herrscht eine Sorge vor Überregulation in der Phase der Entwicklung eines Proof-of-Principle in der Form eines erfolgreichen Prototypen. Dies ist gepaart mit der Ansicht, dass bestehende Regulatorien zu Nanomaterialien nur entsprechend angepasst werden sollten. Andererseits sehen viele Forscher:innen Regulatorien als notwendige Begleitmaßnahme der technischen Hochskalierung und Erhöhung des TRL von Applikationen. Dies inkludiert gesundheitliche und umwelttechnische Aspekte und auch technische Vergleichbarkeit. Die Wahrnehmung der gesundheitlichen Risiken und der Langzeiteffekte geht unter den Befragten teils stark auseinander. Ein Drittel schätzt 2DH als unbedenklich ein, ein Drittel meint Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt sind noch nicht ausreichend abschätzbar.

2DH Aktionsfelder und Handlungsbedarf

Reproduzierbare und skalierbare Herstellung

- Defektkontrolle und Oberflächenchemie kontrollieren, damit Prozesse transferierbar werden zu größeren Skalen ohne dass sich 2DH Zusammensetzung und damit Eigenschaften ändern beim Hochskalieren
- Kosten reduzieren bei gleichzeitiger Steigerung auf industriell interessante Mengen (von Gramm auf Kilogramm)
- Prozesskontrolle – konsistente Qualität von Batch zu Batch
- Verunreinigungen durch Ätzprodukte im Top-Down Prozess reduzieren
- Reduzierung des Energiebedarfs in der Synthese

Prozessdesign und Integration in industrielle Herstellrouten

- mechanische Robustheit verbessern, Restacking verhindern
- Verbesserte Homogenität großer Schichten (Appliziertechniken nasschemischer Lösungen)
- Simplifizierung der Prozessschritte
- Arbeitssicherheit in der Synthese erhöhen (giftige Hilfsstoffe)

Langzeitverhalten

- Elektrochemisches, thermisches, mechanisches Verhalten unter Realbedingungen
- Lagerung: Dispersionsstabilität, Sedimentation

Validierung & Standardisierung

- Standardisierte Tests und Berichtswesen mit harmonisierten Validierungsprozeduren sowie definierte Referenzmaterialien
- Benchmarking Tests mit realen Umgebungsmedien, Round Robin Tests zur Steigerung der Vergleichbarkeit und des Vertrauens
- Massive Intensivierung im Bereich Safety und Sustainability entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Unternehmen, die Graphene(derivate) herstellen geben oft nicht die genaue Zusammensetzung und Reinheit an, was große Auswirkung auf die Eigenschaften der daraus gefertigten Sensoren hat
- China wird als Treiber in der Standardisierung von einigen Experten wahrgenommen
- Bedarf an Regulatorien für 2DH Sensoren im direkten Hautkontakt in der Nutzung

Wirtschaftliche Aspekte

- Realkosten Betrachtungen und Lieferketten Kostentreiber identifizieren, um belastbarere Szenarien zur Hochskalierung zu identifizieren
- Betrachtung von non-performance Faktoren (Safety, Environmental, Energiebedarf in der Herstellung)
- Keine oder minimale Verwendung von kritischen Rohstoffen (Titan, Vanadium)

3 Stakeholder:innen Workshop

Der PEARL-Mat Stakeholder Workshop fand am 23. Jänner 2026 von 9:30-12:00 in einem hybriden Format statt. Die Teilnehmenden waren teilweise vor Ort bei AC2T in Wiener Neustadt und nahmen teilweise online teil. Die Abhaltung erfolgte über ein Online-Besprechungstool durch geteilte Inhalte der Projektverantwortlichen sowie über interaktive Elemente in Form einer Umfrage mit Mentimeter. Das Konzept des Workshops lässt sich in groben Zügen folgendermaßen umreißen:

Partner- und Projektvorstellung
Einblicke in vorläufige Ergebnisse aus Literaturrecherche, Expert:inneninterviews und Trendanalyse
Interaktive Session: Fragen an Publikum in einer Livebefragung mit
Panelauswertung
Offene Diskussionsrunde angeleitet von Projektteam

Die Teilnehmenden des Workshops kamen Großteils aus Wissenschaft und Forschung sowie der Verwaltung mit Fokus auf Österreich aber auch Gästen aus dem europäischen Ausland. Die Fokusthemen der (Forschungs)Arbeit der Teilnehmenden wurde zu Beginn in Menti abgefragt: Technology Assessment, Biomakromolekül -Engineering, 2D Materialien generell, Tribologie von 2D Materialien, Hydrogele und Biopolymere, MXene sowie Safe-and-Sustainable-by-Design.

Nach einer Begrüßung der Teilnehmenden vor Ort und online wurde das PEARL-Mat Projekt und das verantwortliche Projektteam vorgestellt. Im nächsten Schritt gaben Andras Vernes und Katharina Lang-Hogrefe Einblicke in die Forschungsergebnisse aus der Literaturrecherche zu 2D+ Hybridmaterialien und Engineered Living Materials. Dieser Abschnitt wurde mit einer thematischen Fragerunde abgeschlossen.

Zentrales Ziel des Stakeholder Workshops war es, die Expert:innenmeinung aus verschiedenen Fachrichtungen zu den beiden Materialgruppen zu fassen. Zu diesem Zweck wurde die interaktive Session mit einer Livebefragung an das Publikum nach drei thematischen Blöcken aufgeteilt: 1. Trends, 2. Märkte & Forschung und 3. Bedarf an strategischem und politischem Handeln.

Tabelle 16. Liste der angemeldeten Teilnehmer:innen für den PEARL-Mat Stakeholder Workshop mit Angabe der Institution.

Vorname	Nachname	Institution
Bernhard	Bayer	TU Wien, Institut für Materialchemie
Pedro	Fardim	KU Leuven
Manuel	Rodriguez	AC2T
Carsten	Gachot	TU Wien
Clemens	Wolf	BNN
Katharina	Lang-Hogrefe	BNN
Ulrike	Cihak-Bayr	AC2T
Michael	Ausserlechner	Medical University Innsbruck
Rupert	Kargl	Technical University Graz
David	Bučak-Gasser	Technical University Graz
Alexander	Pogany	BMIMI
Anna	Bellomo	BMIMI
Thomas	Jakl	BMLUK
Andras	Vernes	AC2T
Karin	Stana Kleinschek	Technical University Graz
Matiss	Reinfelds	BNN

TRENDS

Für beide Materialgruppen wurden aus der Literaturrecherche jeweils sechs Trends identifiziert. In Abbildung 20 und Abbildung 21 sind diese mit den entsprechenden Bewertungen der Expert:innen dargestellt. Für Engineered Living Materials bestand der größte Konsens darin, dass die Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit und Regularien noch signifikant sind. Für 2D+ Hybridmaterialien war eindeutig, dass skalierbare Produktion höchst relevant ist, um die Materialien in hoher Qualität zu produzieren. In Bezug auf die Anwendung dieser Materialgruppe fanden die Bereiche Energieumwandlung und -speicherung sowie Photonik und Optoelektronik die größte Zustimmung.

Do you agree with the following trends regarding Engineered Living Materials?

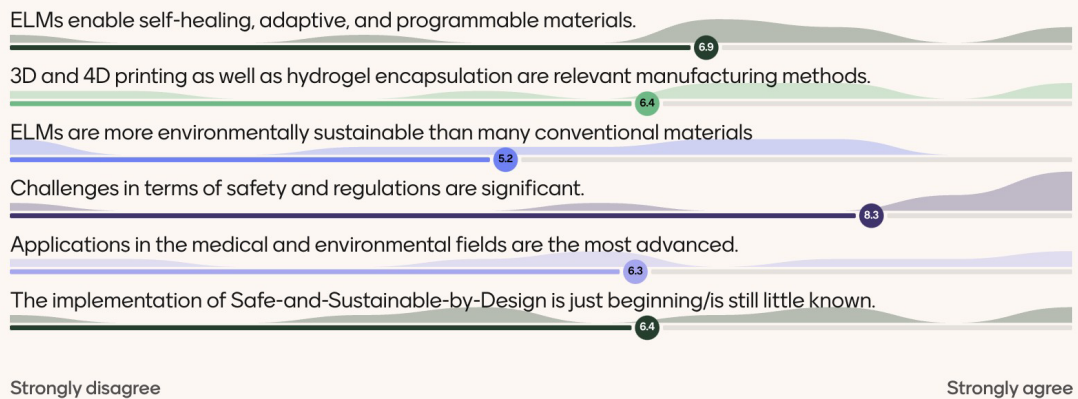


Abbildung 20. Trends für Engineered Living Materials, die aus der Literaturrecherche bestimmt wurden, bewertet nach deren Übereinstimmung mit Meinung der Expert:innen.

Do you agree with the following trends regarding 2D+ Hybrid Materials?

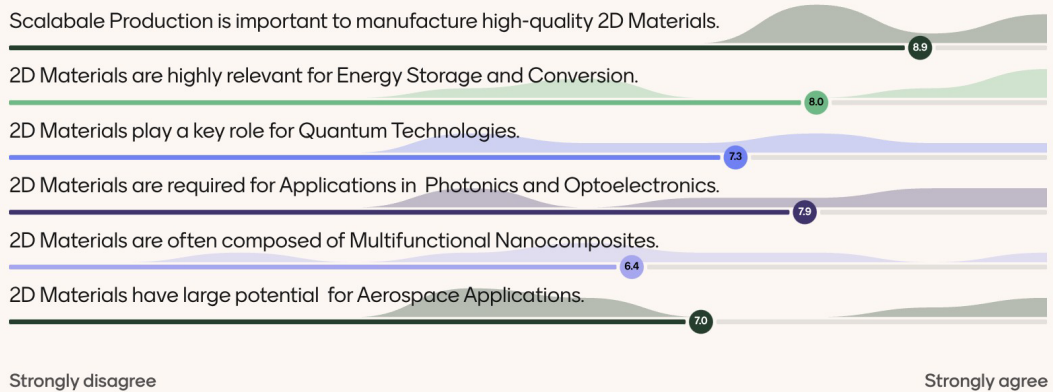


Abbildung 21. Trends für 2D+ Hybridmaterialien, die aus der Literaturrecherche bestimmt wurden, bewertet nach deren Übereinstimmung mit Meinung der Expert:innen.

Um bestehende Lücken in der Recherche zu identifizieren, wurden die Teilnehmenden nach weiteren relevanten Trends befragt:

- 2D+ Materialien als ultimativ dünne funktionale Beschichtungen
- Tribologie
- Vakuum Schmierung
- Potential dieser Materialgruppen, um die Resilienz der industriellen Produktion zu steigern
- Verbesserte Analytik der Interaktion mit Zellen und Gewebe
- Das Potential der beiden Materialgruppen zu echten „Game Changers“
- Integration mit neuen Werkzeugen der Biotechnologie und KI
- Die Detektion von spezifischen Clustern im Bereich Risiko von beiden Materialgruppen

Zudem wurde ein Stimmungsbild generiert, für welche Felder ELMs und 2D+ Hybridmaterialien in Zukunft eine große Rolle spielen könnten: Tierversuche, Umweltpolitik, Gesundheitspolitik, Zirkularität, Unsicherheit in der Lieferkette, kritische Rohstoffe. Während die Relevanz von ELMs für Tierversuche sehr hoch eingeschätzt wurde, war diese für 2DH vernachlässigbar. Weiters werden ELMs sehr relevant für die Gesundheitspolitik und auch relevant für umweltpolitische Themen eingestuft. 2D+ Hybridmaterialien zeigten in der Umfrage die größte Relevanz beim Thema kritische Rohstoffe sowie auch in der Umweltpolitik. In Bezug auf Zirkularität und Unsicherheit in der Lieferkette waren die Meinungen der Teilnehmenden sehr unterschiedlich, wodurch kein genauer Trend abgelesen werden kann.

In der anschließenden Diskussionsrunde kam zur Sprache, dass 2D Materialien aktuell bei der Markteinführung noch Probleme mit Upscaling und Preis haben und deshalb vor allem in Nischenmärkten vertreten sind. In Bezug auf Kreislauffähigkeit müsste laut Expert:innen klar nach den Anwendungsfeldern unterschieden werden. Während für Beschichtungen z.B. in der Elektronikindustrie die Mengen relativ gering sind, sind Recycling-Strategien für großvolumige Anwendungen in Superkondensatoren und auch in der Katalyse höchst relevant. Auch für den Fachbereich der Tribologie sehen die Expert:innen Herausforderungen in Bezug auf Rückgewinnung, da die Materialien immer großflächig verteilt und teilweise auch verbraucht werden. In Bezug auf Sicherheit dieser oft auch in Nano-Form vorliegenden Materialien sahen die Experten wenig Risiko, da die meisten Anwendungen als geschlossene Systeme entwickelt werden.

MÄRKTE UND FORSCHUNG

Die beiden Materialgruppen können laut Expert:innen sehr unterschiedliche Marktbedürfnisse adressieren. Tabelle 17 zeigt die genannten Marktbedürfnisse, die von den beiden Materialgruppen adressiert werden können. Während im Kreis der Workshopteilnehmer vor allem für ELMs Ideen aus dem Bereich Gesundheit und Medizin genannt wurden, konzentrierten sich die Felder für 2D+ Materialien vor allem auf Elektronik und multifunktionelle Anwendungen in Beschichtungen oder Katalysatoren.

Tabelle 17. Auflistung der Marktbedürfnisse die laut den Teilnehmenden von Engineered Living Materials und 2D+ Hybridmaterialien adressiert werden können.

Engineered Living Materials	2D+ Hybridmaterialien
Smarte adaptive Materialien	Probleme der Halbleiterszene
Regeneratives Gewebe/Haut/Gefäßtransplantate	Multifunktionale Beschichtungen
Biobasierte Materialien	Wasserstoffherstellung
Drug Screening	Sensoren
Arzneimittelvalidierung in komplexen Gewebeäquivalenten	More-than-Moore & niedrigpreisige (Opto)elektronik
Verbesserung bestehender Materialien (z.B. Schutzschichten auf Beton)	Multifunktionale Katalysatormaterialien für nachhaltige Energieumwandlung
Toxizitätstests für Multi-Organ on Chip	

Für die aktuellen Entwicklungen in der Wissenschaft wurden für beide Materialgruppen die Forschungsfelder mit dem größten Entwicklungspotential abgefragt. Für Engineered Living Materials beinhaltete dies den Ersatz von State-of-the Art analytischen Tests, der Produktion von Spenderorganen, Biosensoren im Healthcare-Bereich, Smarte Beschichtungen, CO₂-negativer Beton, Multi Organ on Chip und Regenerative Medizin im Allgemeinen. Dies unterschied sich deutlich von den Forschungsfeldern, welche die Expert:innen für 2DH als besonders relevant ansahen: Halbleiter allgemein, Energiespeicher, Skalierbare Synthesewege, 2d+ Hybridisation, Sensoren, Ersatz von PFAS, Weltraumanwendungen und Methoden zur Abscheidung der Materialien.

Mit speziellem Blick auf Europa gab es interessante Wortmeldungen der Teilnehmenden zum Potential dieser innovativen Materialien sowohl in ökonomischer Perspektive wie auch von Seiten der Wissenschaft. Mit Blick auf Tabelle 18 wird deutlich, dass Europa noch

großes, unausgeschöpftes Potential besitzt. Um das auszuschöpfen sind politische und finanzielle Rahmenbedingungen notwendig, die im folgenden thematischen Block diskutiert wurden.

Tabelle 18. Gezieltes Potential der beiden Materialgruppen für Europa, sowohl für die Wirtschaft wie auch die Forschung.

Ökonomisches Potential	Forschungspotential
Aktuell Spinout von neuen 2d+ Sulfiden als Materialien für nachhaltige Technologien	Luftfahrt und Automotive
Verringerung der Importabhängigkeit von kritischen Roh- und Werkstoffe, v.a. für die Bereiche Energie und Ernährung	KI in Material Engineering und Entdeckung
Wettbewerbsvorteil gegenüber China und USA zu gewinnen	Ersatz von seltenen Erden und kritischen Materialien
Beschleunigung der Entwicklung und pharmazeutischen Testung von neuen Medikamenten und Therapeutika	Durch geförderte Grundlagenforschung hat Europa einen Vorsprung bei fundamental neuen Konzepten für skalierbare Materialien
Neue diagnostische Werkzeuge für patientenorientierte Therapie in der Präzisionsmedizin	

In der Diskussionsrunde wurde gefragt, wo die größten Unterschiede zwischen Österreich und dem Rest Europas gesehen werden. Von ELM Expert:innen die Schweiz als Beispiel genannt, die sich in der Forschung zu biologischen Materialien und Gewebe Engineering als besonders innovativ gezeigt hat. Auch die Benelux Staaten wurden als Positivbeispiel für gemeinsame Anstrengungen genannt und damit die Wichtigkeit von strategischen Netzwerken für bestimmte Themengruppen. Die 2DH Expert:innen verwiesen auf international bestehende Netzwerke wie das Graphene Flagship, das allerdings im Auslaufen begriffen ist, und betonen, dass spezifische nationale Netzwerke die österreichische Forschungslandschaft noch besser untereinander vernetzen könnte.

Daraufhin wurde diskutiert, ob eine größere Überschneidung oder Austausch der Communities für ELMs und 2DH in Bezug auf Forschung oder gemeinsame Anwendungen sinnvoll wäre. Hier wurde auf die verschiedenen Initiativen für Advanced Materials verwiesen, an denen auch diese beiden Materialgruppen noch besser andocken könnten.

BEDARF AN STRATEGISCHEM UND POLITISCHEM HANDELN

In einer Umfrage wurde erhoben, welche Kontrollinstrumente die Teilnehmenden als besonders nützlich erachten. Förderungen für angewandte Forschung zeigten hier eindeutig die größte Relevanz für die Expert:innen, jedoch wurden auch Förderungen für Grundlagenforschung und Scale-Up hoch bewertet. Förderungen für gezielte Produktentwicklungen und relevante Netzwerke wurden als mittelmäßig wirkungsvoll eingeschätzt, jedoch deutlich vor strategischen Dokumenten wie White Paper oder gezielten Regulierungen.

Which control instruments would be particularly useful?

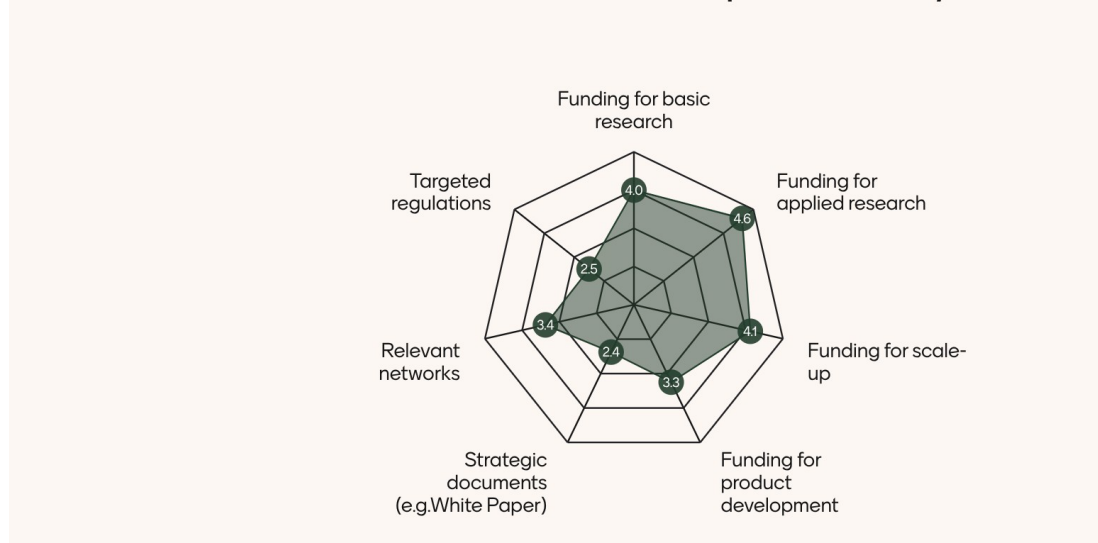


Abbildung 22. Abfrage der Relevanz verschiedener Kontrollinstrumente.

Hinsichtlich Regulatorik wurden größter Handlungsbedarf in folgenden Punkten gesehen:

- Klare Kommunikation darüber welche Sicherheitsthemen bereits rechtlich geregelt sind (Chemikalien, Produktsicherheit, andere)
- Eignung bzw. Adaption bestehender Regelungen zu Nanomaterialien überprüfen
- Früheres Einbeziehen von politischen Entscheidungsträgern
- Vereinfachung von Regulatorien statt Erhöhung der Komplexität
- Endanwendung von Beginn an in Regelungen einbeziehen
- State of the Art Alternativen und deren Schädlichkeit in die Bewertung mit einbeziehen
- Vermeidung von Überregulierung

- Erhöhen der Hürden für Tierversuche in der Grundlagen- und angewandten Forschung, um den Übergang von traditionellen Tierversuchen zu NAMs zu beschleunigen

Im Bereich der Politik sahen die Expert:innen die größten Handlungsfelder in der Konsumentensicherheit, im stärkeren Fokus auf die gesundheitlichen Auswirkungen von Materialien zusätzlich zu Gesichtspunkten von Leistung und Wirtschaftlichkeit, und mehr finanzielle Unterstützung und Bewusstsein für Materialforschung generell. Hier wurde kritisiert, dass die aktuelle Förderungslandschaft in Österreich und Europa eine sehr „zerstreute“ Strategie in Bezug auf Themen erfordert, um sich an die engen Ausschreibungstexte anzupassen. Dafür fehle es dann aber an Sichtbarkeit und einem inhaltlich kontinuierlichen Außenauftritt, weshalb weitere Initiativen wie etwa das Graphene Flagship begrüßenswert wären. Effizientere Modelle für Forschungsförderung (nicht zwangsläufig mehr Budget) wurden auch im Anschluss diskutiert und zielte auf die immer niedrigeren Erfolgsquoten für Forschungsförderungen ab. Gleichzeitig steigen Aufwand und Ressourcen für die Antragsstellung stetig an, ebenso wie für die Beurteilung dieser. Als mögliche Lösungsansätze wurden ein Lotteriesystem vorgeschlagen oder eine einfache Limitierung der einzureichenden Anträge auf eine Maximalanzahl (pro Call aber auch pro Bewerber:in).

Schließlich sollten Länder mit hoher Aktivität in Bezug auf Forschung und Produktion von ELMs und 2DH über Best-Practice Beispiele berichten. Mehrfach genannt wurden das Vereinigte Königreich sowie die USA. Für 2D Materialien wurden explizit auch die Ukraine gelistet, weitere Nennungen gab es für Chile, China, die Niederlande und die Schweiz. Zudem wurden zwei Best-Practice Beispiele angeführt, zum einen fokussierte, thematische Plattform Zuschüsse zu einem bestimmten Thema, um Wissenschaftler national zu verknüpfen und es gemeinsam voranzutreiben sowie international einen Wettbewerbsvorteil zu gewinnen. Zum anderen kam als Beispiel von der KU Leuven eine interdisziplinäre „Meta Thinking Group“, die sich auf zukünftige nachhaltige Materialien fokussiert.

Zum Abschluss wurde den Teilnehmenden die Möglichkeit gegeben, sich innerhalb des Workshops zu vernetzen und relevante Initiativen oder Projekte im Plenum zu teilen. Der Teilnehmer Prof. Bernhard Bayer stellt Kooperationsmöglichkeiten mit seiner sehr aktiven Forschungsgruppe zu 2D+ Materialien an der TU Wien (nanobayer.com) vor mit der weltweit einzigartigen Kombination aus Diffraktion, Spektroskopie und in-situ Mikroskopie der Synthese, was mit einem ERC Consolidator Grant für Highentropie 2D Materials ausgezeichnet wurde.

Neben einer Sonderausgabe im Journal „Discover Materials“ zu Engineered Living Materials mit Anna Sandak von der Universität von Primorska als Editorin, wies Pedro Fardim von der KU Leuven auf die strategische Roadmap dieser EPNOE (European Polysaccharide Network of Excellence) hin. Mit dieser Forschungsroadmap sollen relevante wissenschaftlichen Fragen zu nachhaltigen Lösungen von Biomasse und Polysacchariden beantwortet werden. Die Biosynthese von Polysacchariden mit vorhersehbaren und komplexen 3D-Architekturen und Funktionen über mehrere Skalen in einem kontinuierlichen Produktionskreis wird als zentrales Forschungsthema angesehen ebenso wie Biosynthese zur bioaktiven Polysaccharide-Gewinnung. (Amaral, 2021)

Das Feedback zum Workshop war positiv und die Erwartungen der Teilnehmenden wurden erfüllt. Wie in Abbildung 23 ersichtlich, wurde das Tempo als angemessen und der präsentierte Inhalt als interessant und relevant erachtet. Besonders die interaktive Session wurde als nützlich empfunden und die Teilnehmenden hatten den Eindruck, sich mit ihren Gedanken und Meinungen in die Diskussion einbringen zu können.

Do you agree or disagree with these statements?

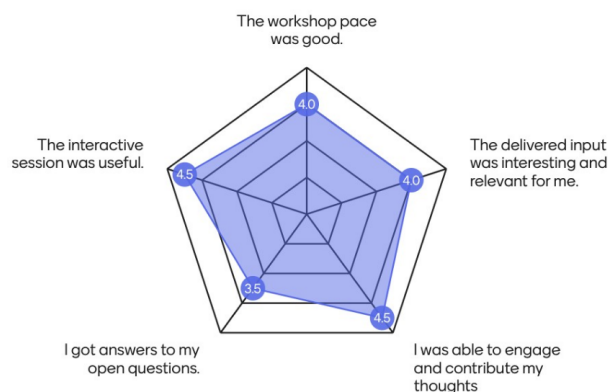


Abbildung 23. Feedback Grafik des Workshops.

Die Teilnehmenden hatten zudem die Möglichkeit in einem freien Kommentar noch Rückmeldungen zu geben, dabei kam folgender Wunsch auf: „It would have been interesting to get more information from potential users, producers and traders of ELM“. Für zukünftige Veranstaltungen könnte also die Industrieperspektive noch mehr berücksichtigt werden. Zudem würde ein physisches Meeting präferiert werden, um den Austausch aktiver zu gestalten.

4 Trendanalyse

4.1 2D/2DHybrid Materialien Fokus International

Haupttrends in 2D Materialien

Die Forschungs- und Technologieaktivitäten erstrecken sich über alle 2D Materialgruppen, deren Hybridkombinationen und ebenso sind prozesstechnische Themen gleichermaßen vertreten wie Grundlagenforschung zur Charakterisierung der herausragenden Eigenschaftskombinationen von 2DH.

Der Bedarf nach miniaturisierten, energieeffizienten Elektronikbauteilen in Computersystemen und Unterhaltungselektronik kann durch 2DH bedient werden über extrem dünne 2DH Isolatoren oder dielektrischen Schichten. Weiters bieten die Fortschritte durch 2DH in der Halbleitertechnik und Optoelektronik Lösungen für die Limits der Silizium-basierten Systeme um schnellere Transistoren, Photodetektoren zu ermöglichen.

Der Energiesektor wendet 2DH in Batterien, Superkondensatoren und Brennstoffzellen an, wo die hohe Leitfähigkeit kombiniert mit mechanischer Stabilität gebraucht wird. Als Katalysatoren treiben 2DH die Weiterentwicklung von grüner Wasserstoffproduktion.

2DH finden sich in biomedizinischen Anwendungen wie Drug Delivery oder Bildgebungstechnologien sowie Sensoren oder reaktive Schichten für Umweltmonitoring oder auch im Gesundheitsbereich als hochsensible Sensoren. Ebenso sind Membrananwendungen zur Entsalzung oder Wassergewinnung durch 2DH extrem energieeffizient.

In den letzten 12 Monaten (Stand Anfang 2026) gab es folgende massive Fortschritte, die von neuen Herstellungsverfahren bis hin zu Rekordwerten in der Energieumwandlung reichen.

Durchbruch in der MXene Synthese

Prof. Dmitri Talapin, Universität Chicago (M-STAR Center), entwickelte eine Bottom-up Methode über einen CVD Prozess, die das mühsame Herausätzen aus MAX Phasen umgeht. Dieses Verfahren senkt die Produktionskosten um das 100-fache und macht MXene für den industriellen Massenmarkt attraktiver
An der TU Dresden (Prof. Xinliang Feng, TUD/MPI Halle) konnten ultrareine MXene ebenfalls über einen CVD Prozess hergestellt werden, was Anwendungsprobleme durch Verunreinigungen mit Ätzprodukten behebt.

MOFs Nobelpreis

Chemienobelpreis 2025 für gezielte Konstruktion stabiler Gerüstverbindungen (Omar M Yaghi: Universität Berkley USA, Susumu Kitagawa: Kyoto Universität Japan, Richard Robson: Universität Melbourne Australien) Prinzip der **Retikulären Chemie** ermöglicht 1 g MOF mit einer Oberfläche eines Fussballfeldes
Anwendung: Direct Air Capture von CO₂, Wassergewinnung aus Wüstenluft, Wasserstoffspeicherung, Wasserstabile Membranen zur Meerwasserentsalzung

LDH Rekord-Katalyse durch Heterostrukturen

LDH-MOF Hybride (MgAl/Zn) zeigen eine drastische gesteigerte Aktivität der photokatalytischen Wasserstoffentwicklung (129 mmol/g)
LDHs lösen als Barriere Material das Shuttle Problem in Li-Schwefel Batterien und verlängern so die Lebensdauer
Anwendung: grüne Wasserstoffproduktion und Ersatz von Iridiumoxid Katalysatoren

Physics World Breakthrough 2025 Preis

an Guangyu Zhang, LuoJun Du (Chinese Academy of Sciences) für die Herstellung der ersten 2D Sheets aus Metall mit einer Dicke von nur 6.3 Angström

Markt für 2D Materialien

Der globale Markt für Graphen und 2D Materialien hatte laut IDTechEx⁴, Grand View Research⁵, business research insights⁶ im Jahr 2025 einen Wert von 16,15 Milliarden US-Dollar und wird im Jahr **2030 auf einen Wert von \$137,7 Milliarden** prognostiziert, bis 2033 bzw. 2036 liegen die Prognosen zwischen USD 2,7 Billionen und USD 3.93 Billionen. Das entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von über 30%. Der Markt konzentriert sich derzeit vor allem auf Graphen und Graphen-Oxidderivate. Weltweite Graphen Produktionskapazitäten werden mit 3500 Tonnen angegeben, wovon mehr als die Hälfte von Asien abgedeckt wird. Industriell akzeptierte Anwendungsbereiche sind vor allem die Batterieproduktion. In den USA werden über 150 Unternehmen genannt, die aktiv an der Produktion oder Anwendung von Graphen beteiligt sind. US Bundesmittel sehen 18% der jährlichen 1,8 Milliarden US-Dollar für Graphenforschung vor.

Wichtigste Markttreiber sind Steigerung der Nachfrage in Energiespeicherung und Elektronikintegration, sowie Leichtbaumaterialien und leitfähige Tinten. Größte Hürden sind die hohen Produktionskosten, die Einschränkungen hinsichtlich Skalierbarkeit, die nicht standardisierte Qualität und regulatorischen Unsicherheiten.

Weltweit führend ist der asiatische Raum, gefolgt von Nordamerika. Der **Anteil von Europa wird mit 15%** angegeben. Insgesamt wird der Markt von 10 Top-Unternehmen nahezu zu 50% bestimmt und Start-ups nehmen 20% ein, der Rest entfällt auf KMUs.

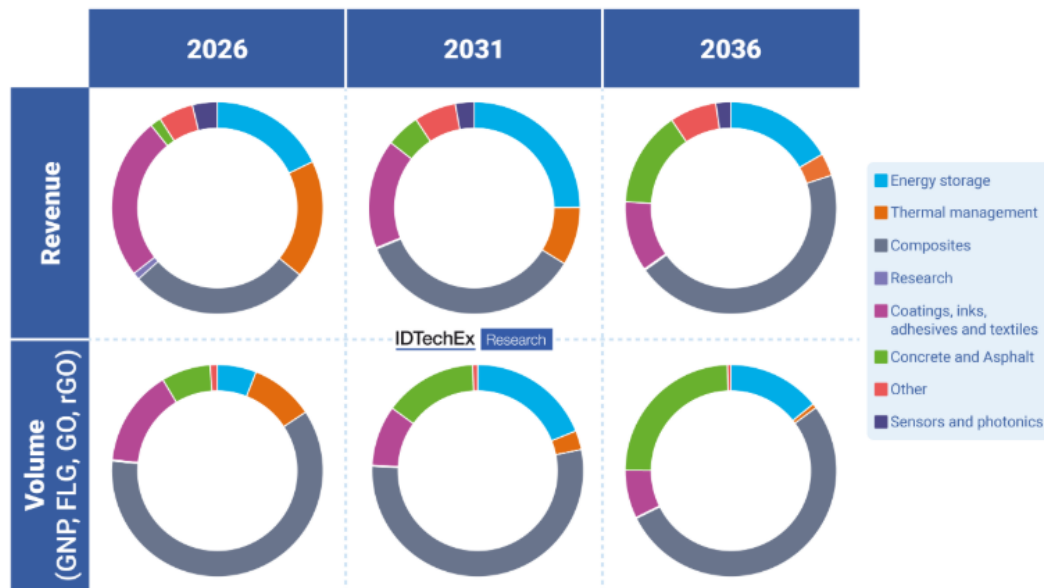
Markttrends zeigen, dass über 70% der Hersteller in skalierbare Produktionstechniken wie CVD und Flüssigphasen Exfoliation investieren. Wachsende Anwendungsgebiete sind:

- funktionelle Schichten (Korrosion, Wärmeleitfähigkeit, Verpackungsindustrie, Schiffsbeschichtungen)
- flexible Elektronik durch gesteigerte Akzeptanz für Wearables
- Graphen-Verbundwerkstoffe in Automotivbereich (Ziel 25% Gewichtsreduktion)
- Superkondensatoren mit mehr als 100000 Ladezyklen (herkömmliche Batterie 2000)
- Leitfähige Tinten auf Graphen Basis (zusammen mit Beschichtungen: 28% Marktanteil)

⁴ Graphene & 2D Materials 2026-2036: Technologies, Markets, Players: IDTechEx

⁵ 2D Materials Beyond Graphene Market To Reach \$3.93Bn By 2033

⁶ Graphene and 2-D Materials Market Size, Share | 2026



Graphene & 2D Materials 2026-2036. IDTechEx forecasts that the graphene market will exceed US\$2.7bn by 2036. Source IDTechEx

Abbildung 24: Weltweite Marktprognose von IDTechEx für 2D Materialien je nach Anwendungssektor. Abbildung entnommen aus <https://www.idtechex.com/en/research-report/graphene-and-2d-materials/1121>

In Europa dominiert die Nachfrage aus dem Automobil sowie Luft- und Raumfahrtsektor mit 40%, gefolgt von 25% aus der Elektronik und 20% für Energiespeicheranwendungen.

In Asien konzentrieren sich die Anwendungen auf Elektronik, gefolgt von Energiespeicherung mit 30% und Beschichtungen mit 15%. Ca. 65% der weltweiten Graphenpatente stammt aus Asien. Treiber sind hier die Unterhaltungselektronik, Automobilsektor, Batteriehersteller, Solartechnik.

Nordamerika konzentriert sich mit Graphen auf Elektronik, gefolgt von Verbundwerkstoffen (30%) und Beschichtungen (20%) mit Verbundwerkstoffen auf Batterieanwendungen und Gewichtseinsparungen in Luft- und Raumfahrt. Start-up beschäftigen sich mehrheitlich mit skalierbaren Produktionstechniken.

Die industrielle Akzeptanz basiert mehrheitlich auf einer Leistungsverbesserung von mehr als 30 % im Vergleich zu herkömmlichen Materialien.

Tabelle 19: Weltweit führende Unternehmen – Herstellung bzw. Anwendung von 2D Materialien

Unternehmen	Schwerpunkt	Land
2D Semiconductors Inc	Hochreinheit; Halbleiterindustrie, Luftfahrt	USA
Graphenea S.A	Chemische Präzisionsfertigung; Membranen, CVD Prozess	Spanien
NanoXplore Inc.	Hohe Kapazität	Canada
Sixth Element Materials Technology Co., Ltd.	Massenproduktion, Korrosionsschutz, Batterien	China
Versarien plc	Composites (Textilien, Beton)	Großbritannien
2D Layer Materials Pte. Ltd	Graphen als Additiv	Singapur
XG Sciences, Inc.	Pionier Graphen-Nanoplättchen	USA
ACS Material, LLC	Hochreinheit; Halbleiterindustrie, Luftfahrt	USA
Thomas Swan & Co. Ltd.	Chemische Präzisionsfertigung; Beschichtungen	Großbritannien
Carbon Ukraine	MXene, Max Phasen	Ukraine, USA

Europäische Themenführerschaften - Forschungsprojekte und Aktivitäten
 Im Zeitraum 1.2. 2024 bis 31.12. 2029 sind 117 aktive Horizon Projekte mit dem Keyword „2D Material“ mit einem Fördervolumen von 63.8 Mio € laut CORDIS zu finden.

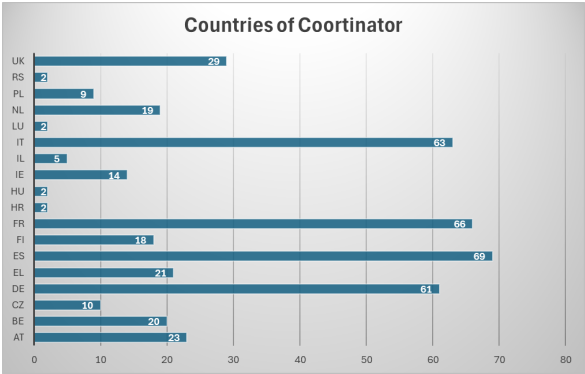


Abbildung 25: Die Herkunftsländer der Koordinatoren von in 2025 laufenden 2DH EU Projekten

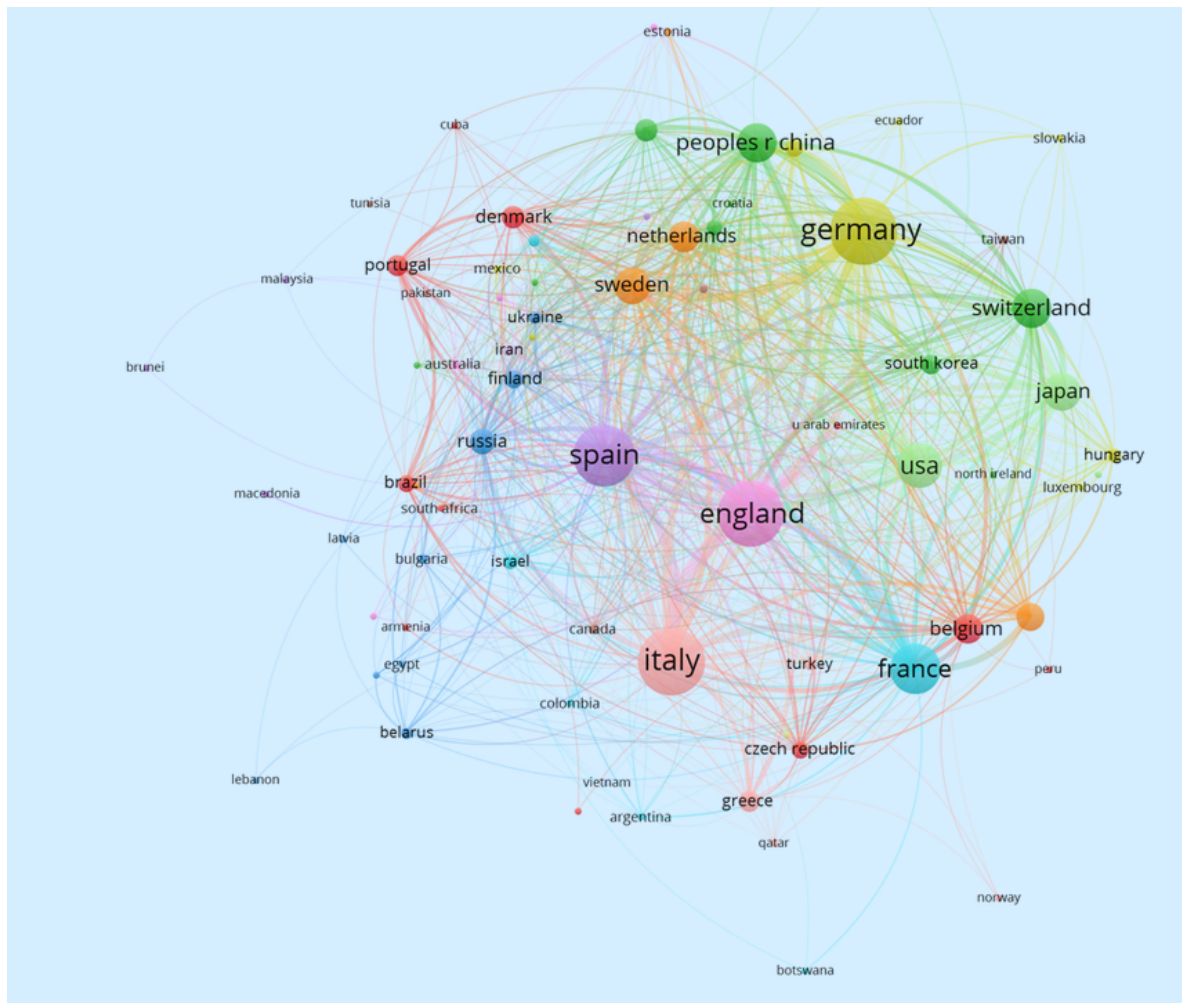


Abbildung 26: Graphene Flagship Partner nach Länderherkunft.

Graphene Flagship

Das Graphene Flagship wurde 2013 für 10 Jahre gegründet und hat in 4 Phasen Projektvolumen von 1 Milliarde Euro für Grundlagenforschung und die Überführung in Prototypen aufgewendet, wobei 500 Millionen Euro aus nationalen Mitteln bereitgestellt wurden. Ab 2023 gibt es folgende 13 Einzelprojekte und eine Pilotlinie (2D-EPL, 20 Mio €). Die Pilot Line fokussiert auf zuverlässige Großvolumenproduktion von Graphen und TMDC basierte Elektronik, Photonik und Sensoren, was unter anderem über eine Multi-Projekt Wafer Produktion ermöglicht wird. Teilnehmer: Graphenea (Spanien), AMO, VTT (Finnland), IHP, Imec (Belgien). Zusammenarbeit mit der Langzeitinitiative Europractice (Start 1995, um europäische Mikroelektronik Forschung über niedrighschwellige Zugang zu Fertigungstools zu fördern; zentraler Pfeiler des European Chips Act)

Die vom Graphene Flagship vorgestellte Roadmap ist in Abbildung 27 zu sehen. Die Abgrenzung und Zuordnung zu den einzelnen Anwendungsgruppen ist uneinheitlich und lehnt sich nur teilweise an die Priority Areas (energy, mobility, construction, electronics, health) der IAM4EU Roadmap⁷ an.

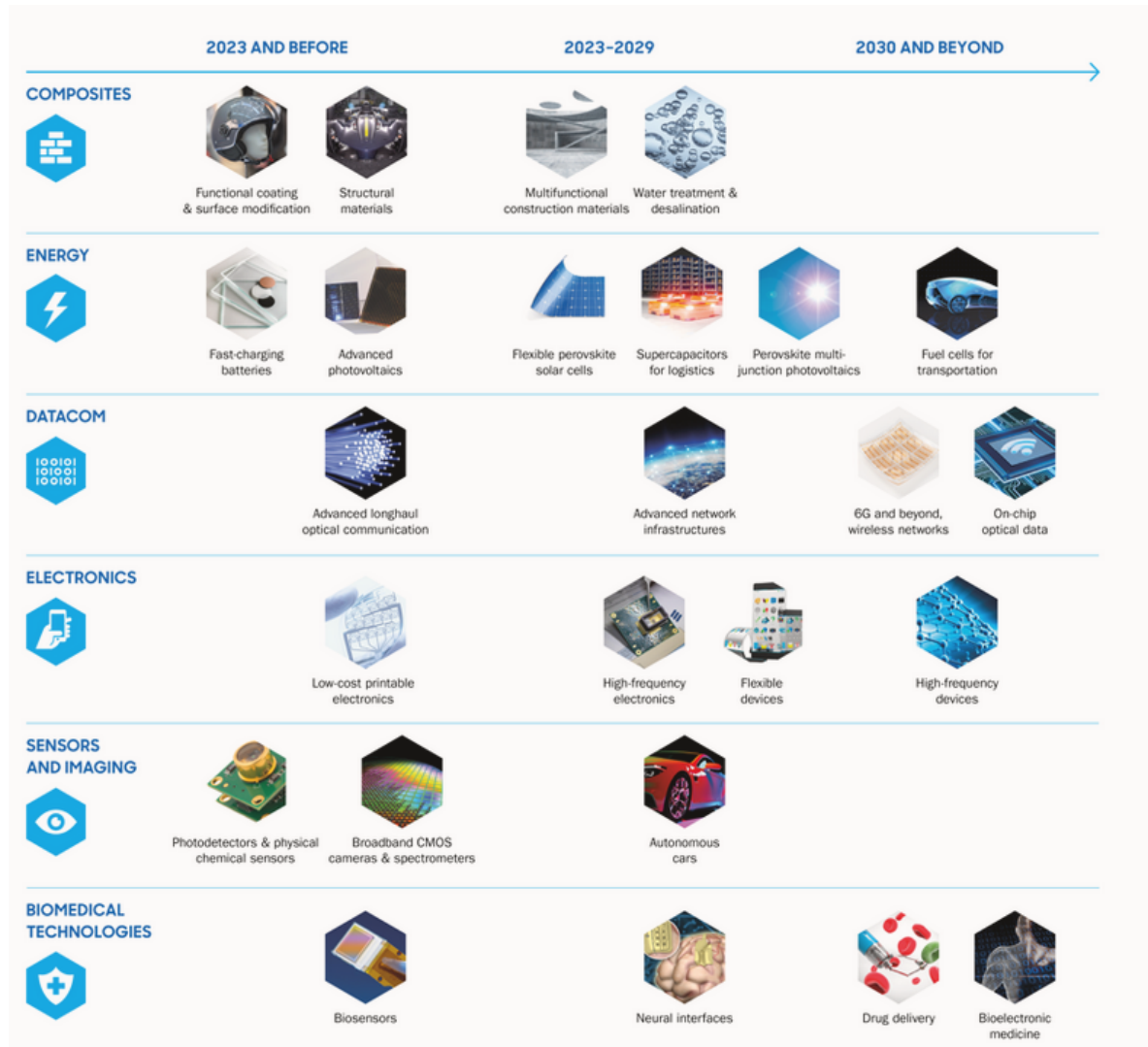


Abbildung 27: Technologie und Innovations-Roadmap des Graphene Flagships (<https://graphene-flagship.eu/industrialisation/roadmap>)

⁷ Innovative Advanced Materials for Europe, European Co-programmed Partnership: Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA), November 2024

Projektname	EU Framework: Themenbereich (Projektvolumen)	Konsortialführer (Land)
GrapheneEU	CSA: Koordination Gesamtinitiative (3 Mio. €)	Chalmers University of Technology (Schweden)
GATEPOST	RIA: Elektronik, Photonik (6.5 Mio. €)	IHP Leibniz Institute for High Performance Microelectronics (Deutschland)
2DNeuralVision	RIA: Elektronik, Photonik (5.5 Mio. €)	ICFO Institut de Ciencies Fotoniques (Spanien)
Next-2Digits	RIA: Elektronik, Photonik (4 Mio. €)	National Technical University of Athens (Griechenland)
ARMS	RIA: Energie (4 Mio. €)	Tampere University (Finnland)
GRAPHERGIA	RIA: Energie (4.5 Mio. €)	University of Ioannia (Griechenland)
MUNASET	Biomedizin (4 Mio. €)	Univ. of Applied Science Kaiserslautern (Deutschland)
2D-BioPAD	RIA: Biomedizin (6 Mio. €)	Q-PLAN INTERNATIONAL (Griechenland)
SAFRARI	RIA: Composite, Beschichtungen, SSbD (4 Mio. €)	Univ. West Attica (Griechenland)
GIANCCE	IA: Composite, Beschichtungen (8 Mio. €)	TWI Ltd (UK)
2D-PRINTABLE	RIA: Elektronik, Tinten, kostengünstige, flexible Schaltkreise (4 Mio. €)	Techn. Uni. München (Deutschland)
2DSPIN-TECH	RIA: Spintronik, Speicherchips (3 Mio. €)	Uni. Regensburg (Deutschland)
2D-ENGINE	RIA: Optoelektronik, Chiptechnologie (4 Mio. €)	NCSR Demokritos (Griechenland)
ASYSTOLA	RIA: Bewertung von SSbD (3 Mio. €)	Univ. Bremen (Deutschland)

Schweden: Sio-Graphene

2014 startete das nationale strategische Innovationsprogramm, um die Industrie im Bereich Graphene und 2D Materialentwicklung weiterzuentwickeln und auf ein TRL>5 zu

bringen. Bisher wurden 50 Millionen Euro für 220 Projekte zur Verfügung gestellt, um ein schwedisches 2D Material Ecosystem aufzubauen und 2D Materialien als eine wesentliche Säule der schwedischen Industrie aufzubauen. Es ermöglichte den Aufbau einer industriellen Infrastruktur, die Unterstützung von Start-ups und entwickelte TestBeds für 2D Materials Anwendungen. Die Projekte werden zu 50% durch schwedische Industriepartner co-finanziert.

Chalmers Universität (Göteborg) leitet das SIO Graphene Programm und hat auch im Europäischen Projekt dem Graphene Flagship eine Führungsrolle.

SIO Graphen baute basierend auf 2 Forschungsgruppen (Chalmers und Linköping) ein Netzwerk mit Supply Chains und Wertschöpfungssteigerungen in Schweden auf.

Thematisch sind die Projekte sehr breit aufgestellt von Leichtwerkstoffen, industrielle Prozessautomatisierung, Medizintechnik und Gesundheit oder Tribologie. Alle schwedischen Firmen und Organisationen sind berechtigt zu einer Projektbewerbung, Projekte ohne Firmenbeteiligung sind nicht erwünscht. Das Programm startete nachdem aktiv von staatlicher Seite auf CTOs der großen Unternehmen wie SAAB, ABB zugegangen wurde, um eine Teilnahme zu sichern. SIO Graphen startete mit einer Phase der Feasibility Studies, dann einer Innovation Phase. Dann folgten Demonstrator Projekte mit größeren Projektvolumina. Daneben gab es Strategische Projekte, die beispielsweise Zusammenarbeiten mit Spitälern ermöglichten. Entwicklungen von Standards wurde im Laufe der Zeit ein großes Thema, weil es als im Europäischen Forschungsfeld unterrepräsentiert empfunden wurde. Weiteres wurden verschiedene Roadmaps für Spezialthemen ausgearbeitet: Roadmap für 2D Materials in Biotechnology, Graphene Roadmap, Roadmap Manufacturing.

Sio Graphen hat mehr als 40 Testbeds in Schweden erstellt, um den Übergang von Laborforschung zur Politproduktion und Marktreife zu beschleunigen, beispielsweise zu Verbundwerkstoffen in Beton oder Gummi, Sensortechnik, Oberflächenbeschichtungen.

SIO Graphen hat zahlreiche weltweite Hersteller von Graphenen und anderen 2D Materialien hier zusammengetragen: <https://suppliers.sio grafen.se/>

Ein jährliches Graphene Forum bringt Industriepartner und Forschungsgruppen zusammen, um Forschungsergebnisse der Industrie zu kommunizieren und weitere

Kooperationen zu initialisieren. Die Initiative hat eine strategische Planung bis 2030 mit dem Ziel in eine führende Rolle der industriellen Nutzung von Graphen zu bringen.

Tabelle 20: Pionierunternehmerin in Schweden und schwedische Graphen Lieferanten

Unternehmen	Schwerpunkt
2D fab AB	Produziert Graphen Entstand aus Mid Sweden University
Grafren	Beschichtung von Textilien Spin-off der Linköping Universität
Graphensic AB	Graphen auf SiC für Hochleistungssensoren Spin-off der Linköping Universität
Woxna Graphite AB	Rohstofflieferant für Graphen
Projektfokus	Beteiligte Unternehmen
Antibakterielle Katheter	Firma: Wellspect
Graphen beschichtete Naturfasern	Firmen: Grafren, Triflion, X Shore Robustheitssteigerung als Alternative für synthetische Fasern
Sensoren für Strahlungsmessung	Firmen: Gammadata Instrument AB Sekundärstrahlungsprobleme lösen Kupferleitbahnen durch Graphen ersetzen
Energiespeicher	Firmen: SaltX technologies, VestaSi Verbesserung der Energieeffizienz und Haltbarkeit
Hochleistungs-Verbundwerkstoffe	Firmen: SaltX technologies, VestaSi Verbesserung der Energieeffizienz und Haltbarkeit

Großbritannien

In UK sind wesentliche Knotenpunkte der 2D Material Forschung und Entwicklung angesiedelt.

Manchester: Gesamte Wertschöpfungskette von Forschung bis Industrielle Anwendung

- 2004 Nobelpreis für die erste Isolierung von Graphen (Andre Geim und Konstantin Novoselov)

- Forschung auf unterschiedlichen 2D Materialien für Isolatoren, Halbleiter Supraleiter
- Graphen Engineering Innovation Centre (gegründet 2018) fokussiert sich auf Machbarkeitsstudien und schließt durch Partnerschaften mit Start-up und multinationalen Konzernen die Lücke zwischen akademischer Forschung und Anwendung
- National Graphene Institute an der Universität Manchester (gegründet 2015) ist weltweit führend in der akademischen Forschung
- Henry Royce Institute (Gründung 2015, Eröffnung 2021): Prototypenbau, fungiert als nationales Zentrum für Materialforschung in UK

Cambridge

- Cambridge Graphen Centre (gegründet 2013) <https://www.camgraphic-technology.com/>
- 25 Millionen Euro Funding für optische Transceiver (Sendeempfänger) auf Graphen Basis. Fokus liegt auf einer Verbesserung der Effizienz der Photonik-Technologie, Vergrößerung der Bandbreite für AI Anwendungen und die Mobilfunk-Datenübertragung.
- Eine Vielzahl an einflussreichen, finanzstarken Investoren unterstützten die Gründung und den Ausbau seit 2013: CDP Venture Capital, NATO Innovation Fund, Sony Innovation Fund und Join Capital, mit Beteiligung von Bosch Ventures, Frontier IP Group plc und Indaco Ventures.
- CamGraphic Srl (gegründet 2019 in Italien)
- (a 2D Photonics wholly owned subsidiary) exclusively runs the 700 sqm Inphotec Graphene Photonics development facility located in Pisa, Italy
- Mitglied des European Quantum Industry Consortium <https://www.euroquic.org/>
- European Photonics Industry Consortium <https://epic-photonics.com/>

University of Leeds (Expertin Maria Alfredsson):

- Dotiertes Graphen und Li-Ionen Batterien mit MOF als Stützmaterial für Anoden und Kathoden, Charakterisierungstätigkeiten
- Kooperationen mit dem Centre for Process Innovation CPI in Yorkshire (gegründet 2004) ist ein Teil des High Value Manufacturing Catapults (gegründet 2011), um gedruckte, biegsame und funktionale Elektronik in die Anwendung zu bringen
- Beispiele: PH Sensoren für Covis, Glucose Sensoren

- Förderungen für Prozesstechnologie werden momentan zurückgeschraubt, die Anwendungszentren sollen self-sustainable agieren. Wird kritisch gesehen, weil Prozesse noch zu viel Varianz für gewinnbringende industrielle Anwendungen haben.

Spanien

Hat sich zum wichtigsten Europäischen Zentrum für die Forschung und Entwicklung von 2D Materialien entwickelt. Es kombiniert exzellente Grundlagenforschung mit einer starken Infrastruktur für Technologietransfer und industrielle Anwendung und spielt eine zentrale Rolle im Graphene Flagship.

Forschungszentren:

- ICN2 Katalanisches Institut für Nanowissenschaften und Nanotechnologie (Biosensoren) (gegründet 2003, 2013 Fusion mit dem CSUC, dem Nationalen Spanischen Forschungsrat)
- ICFO Institut für Photonik- Wissenschaften (Quanten-Photonik, Photodetektoren) (gegründet 2002)
- IMDEA Nanociencia (Spintronik, Oberflächenphysik) (gegründet 2007)
- GraphCAT (gegründet 2017)

Unternehmen

- Quv Technologies (2020 Spin-off des ICFO, Barcelona) Bildsensoren auf Basis von Graphen und Quantenpunkten
- Graphenea (gegründet 2010, San Sebastian) Hersteller von CVD Graphen und Graphen-Oxid
- INBRAIN Neuroelectronics (2019 Start-up des ICN2 und ICREA) Graphen basierte neuronale Implantate

Slowakei

Hat sich eine Nische der Anwendung von Graphen erarbeitet für Polymer-Nanokomposite und im Bereich der Quantenphysik mit der Untersuchung von Van-der-Waals Heterostrukturen für Spintronikanwendungen.

- Center for Nanotechnology and Advanced Materials CENAM (gegründet 2024, Bratislava) dient als Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung
- Danubia NanoTech (gegründet 2004, Bratislava) Herstellung von Graphen und Graphen-Oxid, kooperiert mit SAAB für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt
- Saftra Photonics (2014 Spin-off der Pavol-Jozef-Šafárik-Universität)

2DH Materials in den USA

Praktisch alle Themenfelder der 2D Materialien sind vertreten. Dabei sind in der Grundlagenforschung dominierende Zentren: MIT, University Columbia, Berkeley National Lab. Die Großvolumige Produktion und Technologieforschung zur Halbleiterherstellung mittels Graphen und Graphen Derivaten ist neben China und Südkorea auch in den USA angesiedelt.

Auch die NATO verfolgt in den USA aktiv Forschung an 2D Anwendungen für Verteidigungsanwendungen und veröffentlicht 2020 eine detaillierte Einschätzung des Potentials⁸. Diese wird vor allem in Sensorik zur EM Überwachung gesehen, ebenso wie für leichtgewichtige Schutzmaterialien mit erhöhter Festigkeit und mit der Spintronik für die sichere Datenübertragung. Das ERDC Engineer Research and Development Center (gegründet aus militärischen Forschungseinrichtungen des US Army Corps 1999) fokussiert sich auf Composite Anwendungen von Graphen und anderen 2D Materialien in Zement und Polymeren, um die Langlebigkeit und Festigkeit zu steigern

Yuri Gogotsi ist mit einem h-Index von 263 die führende internationale Figur im Bereich MXene und am Entstehungsort der MXene 2011 dem Drexel University, Drexel Nanomaterials Institute (DNI) in Philadelphia, USA, tätig. Der ukrainische Materialwissenschaftler hat 2019 ein Buch zu 2D Materialien und Mxenen herausgegeben⁹ und hat seine Einschätzung zur Zukunft der MXene im renommierten Communication Materials Journal¹⁰ veröffentlicht. Er sieht in naher Zukunft vor allem MXene in der Anwendung für elektromagnetische und thermische Abschirmungen für Elektronik und Menschen. Weiters sieht er MXene in der Anwendung als leitfähiges Tintenmaterial. Damit ist er ein Verfechter der Top-Down Methode, die das Potential hat

⁸ Lecompte, D (Editor): Applied Vehicle Technology Panel, J. NATO Science and Technology Organization, Vol 2, 2020, <https://review.sto.nato.int/images/issue2articleimages/STO-J-02-ALL.pdf>

⁹ <https://www.springerprofessional.de/2d-metal-carbides-and-nitrides-mxenes/17332018>

¹⁰ <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00650-w>

große Mengen herzustellen und durch den nasschemischen Ansatz orteungebunden ist. Anwendungsfokus sind Batterien, leitfähige Tinten, Verbundstoffe. - Mit Prof. Gachot und Prof. Valtiner von der TU Wien haben auch österreichische Forscher Kontakt zu dieser weltweit führenden MXene Community-- Die Bottom-Up Fraktion der MXene Synthes ist in den USA im Bereich der Halbleiterindustrie stark vertreten, wo Reinheit einen anderen Stellenwert hat und CVD Prozesse ohnehin zum Standard gehören.

Geistiges Eigentum – Patente: International und Österreich

183 Patente mit einem Veröffentlichungsdatum 2025 wurden über Espacenet ausgehoben.

8744 Patente wurden über Web-of-Science gefunden und mit den Algorithmen der bibliographischen Analyse ausgewertet.

Die Patentlandschaft zeigt eine überragende Führungsrolle des Asiatischen Raums – allen voran China, gefolgt von Südkorea – und der USA. Führende Unternehmen sind aus der Elektronik und Halbleiterbranche (Samsung Electronics: 147; Taiwan Semiconductor: 71; Intel: 47), die alle im Bereich der Halbleiter Patente anmelden. HP ist mit 34 Patenten auch führend und betätigt sich im Bereich des 3D Drucks mit 2D Tinten sowie allgemeinen Computing Bereichen. Ein Schwerpunkt dürfte immer die Hochskalierung und ein Fokus auf Graphen sein. Viele Patente sind aber nur auf chinesisch oder koreanisch veröffentlicht. Auch hat sich der asiatische Hub mit dem Unternehmen 2D Materials Pte. Ltd. Und dem Centre for Advanced 2D Materials zu einem globalen Zentrum für die Kommerzialisierung entwickelt mit viele Patente im Bereich der Filtration und Batterietechnik.

Österreich patentiert nur im akademischen Feld im Bereich der 2D Materialien.

- TU Wien (Institut für Photonik und Mikroelektronik, Prof. Müller) zur Integration von Graphen und MoS2 in Photodetektoren und Transistoren
- Johanneum research zu Graphen Tinten für gedruckten Elektronik
- AMS-ORSAM zur Effizienzsteigerung von Lichtsensoren
- Infineon Technologies Austrian zu Integration in bestehende Halbleiterprozesse und 2D Materialien für verbesserte thermische Interfaces

4.2 2DH Trends in Österreich

In der 2D Material Forschung besetzt Österreich eine international starke Position im Bereich der Charakterisierung, der Synthese und Grundlagenforschung. Die in Tabelle 21 gelisteten Akteuren in Österreich beschäftigen sich mit Graphenen, MXenen, h-BN, TMDC wie MoS₂, und 2D MoFs sowie mit 2D Hybridverbindungen. In Österreich tätige Forscher sind mit zahlreichen hochrangigen Veröffentlichungen in Nature etc. und durch eine Reihe von **ERC Grants** (*HighEntropy2D* 2023 2 Mio €, *Orbital Chern Insulators* 2 Mio € 2023, *QuantumCalc2D* 2 Mio. € 2023, *ERC Synergy Orbital Cinema* 9 Mio € 2024) im internationalen Spitzenfeld angesiedelt. Die ORCID Nummern in Tabelle 21 verweisen auf die wissenschaftlichen Tätigkeiten, da eine Einzelauswahl von Veröffentlichungen das breite gesamtösterreichische Themenfeld unzureichend abbilden würde.

Grundsätzlich ist eine große Anzahl an 2D Forschungsprojekten in Österreich über **FWF Projekte** finanziert mit 15 laufenden und 2 weiteren mit offenem Projektbeginn. Davon sind 12 an der TU Wien, 2 an der Uni Wien und 2 am ISTA. Laufende **FFG Projekte** sind in Tabelle 22 gelistet, weiters ist Österreich in 4 **EU Horizon Projekten** beteiligt (Graphene Flagship, 2D-Pilot Line, Quantum Flagship, FlexFunction2Sustain).

Tabelle 21: Schlüsselakteure in Österreich

Institution		Name	Fokus im Bereich 2D Materialien
TU Wien	Institut für Festkörperphysik, Gruppe Angewandte Grenzflächenphysik	Prof. Markus Vatiner https://orcid.org/0000-0001-5410-1067	Fest/flüssig Grenzflächen Sensoren, Prototypen, Quantentechnologie
TU Wien	Inst. f. Materialchemie, Gruppe Nanomaterials Synthesis and Integration	Prof. Bernhard Bayer www.nanobayer.com https://orcid.org/0000-0002-4829-3207	High Entropie 2D Materialien, in-situ Charakterisierung Synthese und Integration (h-BN, TMD), funktionelle Schichten
TU Wien	Forschungsgruppe Tribologie	Prof. Carsten Gachot https://orcid.org/0000-0001-6981-1563	MXene Performance u. Synthese, Charakterisierung Tribologie, Schichtapplikation
TU Wien	IAP, Oberflächenphysik	Prof. Ulrike Diebold https://orcid.org/0000-0003-0319-5256	Atomare Defektcharakterisierung, Grundlagenforschung für Energiespeicherungsanwendungen

TU Wien	Atominstitut	Dr. Sarah Skoff https://orcid.org/0000-0002-2601-8407	N-dotiertes Graphen, Quantendots, hochempfindliche Sensoren (Temperatur, Magnetismus)
Universität Wien	Materialphysik	Prof. Jani Kotakoski https://orcid.org/0000-0002-1301-5266	Atomare Manipulation, Abbildung mittels REM
JKU Linz, LIT	Quantum Materials Group, Inst. f. Halbleiter	Prof. Alberta Bonanni https://orcid.org/0000-0003-4425-0346	Synthese (Epitaxie) Charakterisierung magnetisch, Spintronik Quantenoptik, Infrarot Optoelektronik
JKU Linz, LIT	Institut für Halbleiter und Festkörperphysik	Prof. Armando Rastelli https://orcid.org/0000-0002-1343-4962	Optische Halbleiter. Quantum Dots
ISTA		Prof. Georgios Katsaros https://orcid.org/0000-0001-8342-202X	Quantenelektronik, Hybridstrukturen
Johanneum Research	MATERIALS	Dr. Jan Hesse https://orcid.org/0000-0001-9648-7316 , Dr. Barbara Stadlober https://orcid.org/0000-0002-4572-7129	Gedruckte Elektronik Großflächige Strukturierung
Uni. Graz	Elektronische Struktur von Nanomaterialien	Peter Puschnig https://orcid.org/0000-0002-8057-7795	Batterieperformance, 2D-MOF für Li-Ionen Batterien
Uni. Innsbruck	Institut f. Physikalische Chemie	Laerte Patera https://orcid.org/0000-0002-6214-5681	Synthese poröser 2D-Boroxide & 2D-MOFs

Österreich besitzt eine Vorreiterrolle in der **Quantentechnologie**, wodurch dieses Thema auch in der 2D Materialforschung vor allem mit Graphen, Graphen-Oxiden oder auch dotiertem h-BN in Österreich stark vertreten ist. Forschungsgruppen am Atominstitut, am JKU Linz, ISTA und in Innsbruck sind weltführend in gezielter Defektsteuerung und Erzeugung photonischer Quantennetzwerke. Was einerseits der Chiptechnologie Erkenntnisse liefert, um die physikalischen Limits der Siliziumwafer zu überwinden, aber auch in Anwendungsfeldern Verwendung findet wie hochauflösende magnetische und

Temperatur-Sensoren in z.B. Biologischen Anwendungen bis zu Messung von Computerchips, Fehlerdetektion und schafft neue in-situ Messmöglichkeiten.

Besonders stark wahrgenommen wird international auch die **Syntheseforschung** zu MXenen und h-BN über nasschemische als auch CVD Verfahren, was zusammen mit den Tätigkeiten zur atomaren Defektsteuerung eine Verbindungen zu unterschiedlichsten **Anwendungsfeldern** eröffnet. Die folgenden Themen (mit exemplarischen Vertretern) sind in Österreich im internationalen Vergleich sehr stark:

- Funktionale Schichten
 - EM Abschirmungen (neues aufstrebend (B. Bayer TU Wien)
 - Korrosionsschutz (M. Valtiner B. Bayer TU Wien)
 - Schadstoffabbau z.B. Phosphate (B. Bayer TU Wien)
- Thermische Isolationsschichten (B. Bayer TU Wien)
- Tribologie (Prof. Gachot, TU Wien)
- Sensortechnik (M. Valtiner, S. Skoff, D. Eder, TU Wien/ P. Puschnig Uni Graz / A. Bonanni JKU Linz)
- Batterietechnik (Beiträge von D. Eder, P. Mayrhofer TU Wien / P. Puschnig Uni Graz im Bereich der Grundlagenforschung; Fokus des „Battery Valley“ in der Steiermark mehr auf Design und Recycling)

Mit der TU Wien und dem dort ansässigen Dissertantenkolleg „TU-D“ für 2D Materialien des FWF und der Universität Wien bilden Jani Kotakoski (Uni Wien, atomare Manipulation), Markus Valtiner (TU Wien, Grenzflächen, MXene Synthese) und Bernhard Bayer (TU Wien, h-BN Hybrid Synthese u. in-situ Charakterisierung) die „**Wiener Achse**“ und somit das technologisch-wissenschaftliche Fundament in Wien, um 2D-Materialien von der chemischen Entstehung bis zur fertigen Schicht zu verstehen. Zudem deckt die TU auch Performance Tests ab in der Tribologie (Prof. Gachot) und in der Mikroelektronik (Tibor Grasser).

Das Johanneum Research MATERIALS ist mit seinen **Pilotlinien** Spitzenreiter für großflächige Nanoimprint Lithographie Technologie, um hochauflösenden Strukturen auf flexible Folien zu drucken und könnte als Brücke zu industriellem Fertigungsmaßstab von gedruckten 2D Materialien werden. Derzeit besteht kein Fokus auf 2D Materialien. Ein FFG Projekt (*mcPLASMA-lysis*) beschäftigt sich unter anderem mit Graphen-Submikroflocken.

Ansonsten ist Österreich nicht aufgestellt, um im Bereich der großvolumigen Produktion beizutragen, sondern ist geeignet mit hoher Grundlagenforschung und präziser Charakterisierungsmethoden Nischenanwendungen zu besetzen, die wenig Produktionsvolumen erfordern.

Grundsätzlich sind auch österreichische **Firmen** aktiv in 2D Materialprojekten beteiligt. Darunter allen voran aus dem Bereich der Halbleiterfertigung Infineon und AT&S. Aber auch der Anwendungsbereich funktionale Schichten ist mit folgenden österreichischen oder in Österreich ansässigen Firmen stark vertreten: Rübigen www.rubigen.com, ATT advanced thermal technologies www.thermaltech.at, Tribotecnica www.tribotecnica.com, Badger Meter Austria www.s-can.at. Dies zeigt sich in 5 laufenden FFG Projekten (Tabelle 22). Auch das FORTE Programm ist mit dem Projekt *DekoSchirm* mit Industriebeteiligung (carbon-solutions Hintsteiner www.carbon-solutions.at) im Bereich funktionale Schichten aktiv (Leitung: Prof. Bayer TU Wien, 2021-2025).

Start-ups im Bereich 2D Materialien sind in Österreich nur vertreten mit HYDROSOLID, einem Spin off der TU Wien, das Wasserstoffspeicher über 2D Technologie an bei niedrigen Drücken anbietet. Das ermöglicht eine nachhaltige und kompakte Lösung für hocheffiziente Speicherkapazitäten. <https://hydrosolid.com/>

Tabelle 22: Laufende FFG Forschungsprojekte zum Thema 2D Materials

Projektkronym	Titel	Projektkoordinator
3Dadditive2D	Mikro-3D-Druck von 2D-Materialien mit Aerosol Jet Printing für neuartige Wasserstoff- (Photo-) Elektrokatalyse-Elektroden	TU Wien
HeatScreen2D	Screen-Printed Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride Heat Spreaders	TU Wien
Phosphate2D	Functionalized 2D nanomaterials as sensor materials for phosphate detection in water	TU Wien
H2TRAIN	Enabling Digital Technologies for Holistic Health-Lifestyle motivational and assisted supervision supported by AI	Ludwig Boltzmann Gesellschaft GmbH Xtremion Technology Forschungsgesellschaft mbH Silicon Austria Labs GmbH

Laser2D	2D Werkstoffe und laserbasierte Oberflächenverfahren zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Mobilitätsanwendungen	TU Wien (Abschluss 2025)
mcPLASMA-lysis	High Performance Nanocarbon and Carbide Materials Methane-Plasma-Lysis	Johanneum Research MATERIALS

Die Forschungslandschaft in Österreich wird von den Akteuren selbst als **inselartig** beschrieben und eine stärkere institutionalisierte Vernetzung wird als sehr anstrebenswert gesehen.

Österreich ist im **internationalen Vergleich wenig aktiv** in Anwendungsfeldern wie Flexible Elektronik und Wearables, da auch eine Anbindung an großvolumige Unterhaltungselektronik fehlt. Auch Graphen in Beton als Festigkeitssteigerung wird nicht betrieben. Auch 2D Materialien als Drug Delivery System werden derzeit nicht beforscht, da konzentriert man sich in Österreich derzeit auf Liposome oder Polymere als Träger.

Die Positionierung der österreichischen Forschungslandschaft zeichnet sich durch eine synergetische Ergänzung von atomarem Design und in-situ Charakterisierung mit den unterschiedlichen Syntheseprozessen aus. Dabei punktet Österreich mit einem Fokus auf hoher Reproduzierbarkeit und nachhaltigen Prozesse. Dies kann für eine künftige Schlüsselrolle genutzt werden in dem Deep-Tech Bereich des Transfers von Laborerfolgen zu Komponenten mit einem Fokus auf Hochskalierung unter Beibehaltung der Qualität im Grundlagenbereich.

4.3 Engineered Living Materials Fokus International

Forschungsprojekte und Aktivitäten in Europa

Im Folgenden sind Forschungsprojekte gelistet, die in den letzten Jahren zu Engineered Living Materials durchgeführt wurden oder aktuell noch durchgeführt werden. In Hinblick auf nationale Projekte in Österreich wurden abseits von PEARL-Mat in der Datenbank der FFG keine weiteren Projekte zu ELMs identifiziert. Auf der Website des FWF wurden zwei Projekte gefunden, siehe folgende Auflistung. Im europäischen Kontext wurde das Cordis Portal durchsucht, und ergab 150 Treffer. Zwei dieser Projekte haben auch österreichische Beteiligung, einerseits von der TU Graz und TIGER Coatings, andererseits vom Institute for Science and Technology Austria. Zudem wurde analysiert, wie die Beteiligung an ELM-

Projekten im nahen Ausland ist, auch dies ist in der Auflistung ersichtlich. Es wird deutlich, dass Deutschland und Slowenien hier am stärksten in diese innovativen Themen von Forschungsseite involviert sind.

- FWF:
 - Myzeliumbasierte Ton Verbundwerkstoffe in der Architektur
 - Advanced Computational Design
- EU Cordis Portal:
 - 2 mit österr. Beteiligung:
 - REMEDY: TUG, TIGER Coatings: archibiome tattoo für Gebäude
 - VirHoX: ISTA, virus-host mapping tools via 'ribosome hacking'
 - 5 mit slow. Beteiligung
 - 7 mit dt. Beteiligung
 - 2 mit Schweizer Beteiligung
 - 1 mit slowak. Beteiligung
 - 3 mit ital. Beteiligung
 - 0 mit ungar. Beteiligung

Im November 2022 startete eine EIC Pathfinder Challenge für bis zu 60 Monate. Insgesamt 30 Millionen Euro wurden auf 10 Projekte verteilt. Innerhalb dieser Pathfinder Challenge wurde ein Pathfinder Portfolio veröffentlicht (Agency, 2024). Der aktuelle Status und die wichtigsten Punkte dieses öffentlichen Berichts sind im Folgenden zusammengefasst:

- ELSA (ethical, legal and societal aspects) Aktivitäten abgestimmt mit EMA (European Medicines Agency)
- Internationale Summer School geplant
- LCA-Methodiken für ELMs weiterentwickeln
- Plattform für den Austausch wissenschaftlicher Mitarbeiter:innen
- Plan zur Identifikation von Hürden für den Markteintritt
- Whitepaper geplant zu SoA von ELM in Europa

In der Schweiz hat die ETH Zürich die ALIVE | Advanced Engineering with Living Materials Initiative ins Leben gerufen. Die Initiative vereint über 20 Professuren aus den Bereichen Materialwissenschaft, Ingenieurwesen, Biosystemwissenschaften sowie potentiellen Anwendungsfeldern wie Architektur und Gesundheit. Ihren Angaben auf der Website zufolge fand die Abschlussveranstaltung im März 2026 statt (Zürich, 2026).

Außerdem hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Jahr 2023 ein Schwerpunktprogramm (SPP 2451) mit dem Titel „Engineered Living Materials with Adaptive Functions“ eröffnet (Forschungsgemeinschaft, 2026), das über einen Zeitraum von sechs Jahren laufen soll. Im Rahmen dieses Programms wurden mehrere Projekte gefördert, die sich mit dem langfristigen Überleben und der Funktionsfähigkeit von Zellen, mit geeigneten Verarbeitungstechnologien für lebende Zellen, mit der Charakterisierung ihres dynamischen Verhaltens sowie mit der standardisierten Skalierung für die Produktion befassen – ebenso wie mit den potentiellen Risiken bei zukünftigen Anwendungen. Insgesamt wurden 15 Projekte gefördert. (SPP2451, 2025) Erwähnenswert ist auch, dass dieses SPP Konferenzen zu Engineered Living Materials (ELM) organisiert; die nächste ist für Oktober 2026 geplant. (GmbH, 2026)

Engineered Living Materials in den USA

Im Jahr 2016 hat die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) in den USA über ihr Biological Technologies Office (BTO) das Programm Engineered Living Materials gestartet. Im Unterschied zu europäischen Förderprogrammen, bei denen Finanzierungsdaten offen über Plattformen wie CORDIS zugänglich sind, ist die Recherche zu US-Bundesförderungen deutlich aufwendiger. Die verfügbaren Angaben zum ELM-Programm beruhen größtenteils auf verstreuten Quellen – entweder über einzelne Pressemitteilungen, wie im Fall von Ecovative Design, oder über die staatliche Ausgabendatenbank USASpending (<https://www.usaspending.gov/>). Da Suchbegriffe wie „Engineered Living Materials“ dort jedoch nicht immer das vollständige Bild liefern, ist häufig die Recherche über spezifische Grant-Nummern erforderlich, wie sie in den Danksagungen wissenschaftlicher Publikationen genannt werden. Auf diese Weise lässt sich das jeweilige Fördervolumen bzw. die eingesetzten Mittel zuverlässig nachvollziehen. (LLC, 2017)

Das Programm war zweigeteilt aufgebaut: Track 1 konzentrierte sich auf Forschung, die in naher Zukunft aus dem Labor in den praktischen Einsatz überführt werden kann, während Track 2 auf grundlegendere Forschung zu ELM ausgerichtet war.

Track 1 befasste sich konkret mit sogenannten Hybrid-ELM, also Verbundmaterialien aus inerten Strukturgerüsten, die das Wachstum lebender Zellen unterstützen. Die Projektlaufzeit betrug 48 Monate. Dieser Track war in drei Subtasks (A, B und C) untergliedert. Subtask A („Rapid On-Site Growth & Reproduction“) zielte darauf ab, ein stabiles strukturelles Material zu entwickeln, das sich innerhalb von drei Tagen um 50 %

selbst vermehrt. Das daraus resultierende Material sollte für den Bau von Schutzunterkünften oder Barrieren geeignet sein. Subtask B („Self-Organizing Structures“) konzentrierte sich auf die Entwicklung selbstorganisierender Strukturen zur Herstellung präzise musterbarer Verbundmaterialien. Subtask C („Responsive Surfaces“) hatte zum Ziel, sogenannte 2,5-dimensionale Schutzmaterialien zu erzeugen — beispielsweise dünne Schichten mit sehr großer Oberfläche. Die vorgeschlagene konkrete Anwendung konnte von den Förderbewerbern selbst definiert werden; Defense Advanced Research Projects Agency ermutigte jedoch ausdrücklich zur Entwicklung von Materialien, die als äußere Schutzschicht für Unterstände oder Barrieren dienen können.

Track 2 befasste sich mit programmierbaren ELM und umfasste Projekte mit einer Laufzeit von 24 Monaten. In diesem Track ging es um grundlagenorientierte Forschung zur Entwicklung von Methoden, mit denen Entwicklungsprogramme direkt auf genetischer Ebene kodiert werden können. Die zentrale Idee bestand darin, dass sich aus einer einzelnen Vorläuferzelle – einem einzigen ‚Seed‘ – lebende strukturelle Materialien mit definiertem Design heranzüchten lassen. Dazu zählen sowohl präzise Musterbildungen als auch programmierbare makroskopische Formen. Das spezifische ELM-Programm wurde inzwischen abgeschlossen; jedoch wurden seither mehrere verwandte Förderprogramme mit ähnlicher Ausrichtung aufgelegt.

Tabelle 23. Projekte zu Engineered Living Materials und deren Details in den USA seit 2017.

Projektname	Thema	Laufzeit	Volumen in Mio.	Grant-ID und Institution
CLIPS	Kohäsive lebende Schutzoberfläche	2017-2021	\$5,8M(USAspending.gov, 2026)	HR0011-17-2-0037, California Institute of Technology
--	Selbstheilender, sich reproduzierender Beton	2017-2023	\$2,4M(USAspending.gov, 2026)	HR0011-17-2-0039, University of Colorado. Prometheus Materials (USAspending.gov, 2023)
	Materialien für Beschichtungen und Putze (Silica mit Bakterien)	2017-2021	\$2,1M (USAspending.gov, 2026)	HR0011-17-2-0039, University of Minnesota

		2018-2021	\$4,2M(USAspending.gov, 2026)	HR0011-18-2-0027, University of California
	Engineered Living Marine Cement (Dosier, 2019)	2017-2022	\$6,1M(USAspending.gov, 2022)	HR0011-17-C-0077, Biomason
	Engineered Living und Regenerative Pilz-Bakterien-Biokompositstrukturen (McBee et al., 2022)	2017-2021	\$9,4M(USAspending.gov, 2022)	HR0011-17-C-0068, Ecovative Design
Living Paint	Die Fähigkeit von Umwelt- und gentechnisch veränderten Mikroben, eine selbstheilende Farbe zu erzeugen	2018-2020	\$0,7M	HR0011-18-9-0007, Sherwin-Williams.
	Eine elektrische Impedanzplattform zur Kopplung synthetischer Biologie mit Mikroelektronik	2017-2021	\$2,7M(USAspending.gov, 2020)	HR0011-18-C-0034, Quantitative BioSciences, Inc.

Während DARPA's spezielles Programm zu ELM inzwischen abgeschlossen ist, fördert das BTO weiterhin biotechnologische Initiativen, die zwar nicht ausdrücklich als ELM-Programme bezeichnet werden, jedoch durchaus ELM-artige Lösungsansätze ermöglichen. Mehrere jüngere BTO-Programme fallen klar in diese breitere Forschungsrichtung. Im Folgenden werden exemplarisch einige Programme vorgestellt.

Das ARCADIA-Programm konzentriert sich auf die Manipulation mikrobieller Gemeinschaften zur Bildung funktionaler, schützender Biofilme („material probiotics“), die Korrosion verhindern, Reibungswiderstand reduzieren oder Schimmelbildung auf verschiedenen Geräten (im Förderaufruf als „Department of Defense (DoD) assets“ bezeichnet) hemmen können. Drei Institutionen wurden im Rahmen von ARCADIA gefördert; die Projektnamen geben einen Einblick in die jeweiligen Forschungsansätze (nur das Projekt der Texas A&M University läuft noch bis Dezember 2026):

- Columbia University, „Inhibiting Molds with Probiotic Ensembles from Diverse Environments (IMPEDE)“ – 4,0 Mio. USD (Grant-ID HR00112320001).
- Clemson University, „Engineering Control of Organic Coatings on Autonomous Navy Gliders (Eco Coating)“ – 6,8 Mio. USD (Grant-ID HR00112320008).
- Texas A&M University, „Microbes Achieve Resistance to MicroOrganism-influenced Rust (μ ARMOR)“ – 11,3 Mio. USD (Grant-ID HR00112320006).

Das BRACE-Programm (2023) zielt darauf ab, Beton mithilfe biologischer Systeme mit Selbstheilungsfähigkeiten auszustatten. Im Ausschreibungstext wird auf die „creating networks deep in concrete... using rock-inhabiting microbes or consortia that can survive in concrete, form filamentous, vascular structures, and be engineered for customizable function, such as biomineralization for crack repair“ verwiesen. Dies kann auf Deutsch etwa wie folgt wiedergegeben werden: „Netzwerke tief im Beton zu schaffen ... unter Verwendung von gesteinsbewohnenden Mikroben oder Konsortien, die im Beton überleben können, fadenförmige und vaskuläre Strukturen ausbilden und für anpassbare Funktionen – etwa Biomineralisation zur Rissreparatur – gentechnisch modifiziert werden können. Zwei der geförderten Projekte sind öffentlich dokumentiert: das Projekt der University of Colorado Boulder mit dem Titel Reinforced Concrete Repair by an Evolving Visualized Internal Vascular Ecosystem (RC-REVIVE) mit einer Fördersumme von 10 Mio.(Glairon, 2023) USD (Projekt-ID unbekannt) sowie ein weiteres Projekt des Battelle Memorial Institute mit bis zu 7,6 Mio.[Institute, 2023 #1691] USD (Projekt-ID 140D0423C0021).[USAspending.gov, 2026 #1692]

Das TELLUS-Programm erforscht mikrobiell basierte „Sense-and-Respond“-Systeme für die Umweltüberwachung. Es entwickelt Designmethoden für programmierbare mikrobielle Sensoren, die in der Lage sind, mehrere chemische und physikalische Reize zu detektieren und messbare Ausgangssignale zu erzeugen. Zu den geförderten Projekten gehören:

- The Charles Stark Draper Laboratory – 4,9 Mio. USD (Grant-ID HR001124C0423).
- Battelle Memorial Institute – 6,1 Mio. USD (Grant-ID HR001124C0441).

Die Forschung zu ELM in den Vereinigten Staaten beschränkt sich nicht auf DARPA-Programme. Ein prominentes Beispiel ist das Living Materials Laboratory [University of Colorado at Boulder / Department of Civil, 2026 #1693] der University of Colorado unter der Leitung von Wil V. Srubar III, das Projekte mit einer breiten Palette an Finanzierungsquellen umgesetzt hat. Dazu zählen lokale Partner wie die City of Austin und Austin Energy sowie das Colorado Department of Transportation. Ein erheblicher Teil der Unterstützung kam von der National Science Foundation (NSF).

Der wissenschaftliche Fokus des Labors wird wie folgt beschrieben: “We focus our experimental efforts on elucidating fundamental process–structure–property relationships of the new biological building materials that we create.” Eine geeignete deutsche Übersetzung lautet: „Im Zentrum unserer experimentellen Arbeiten steht die

Aufklärung grundlegender Zusammenhänge zwischen Prozessführung, Struktur und Eigenschaften der neuartigen biologischen Baumaterialien, die wir entwickeln. “Neben einzelnen Forschungsgruppen (weitere Beispiele sind The Joshi Lab[University, 2026 #1694] an der Northeastern University sowie das Responsive Biomaterials Lab[Lab, 2026 #1695] der Texas A&M University) ist die Forschung zu Engineered Living Materials in den USA zunehmend auch institutionell organisiert. Ein zentraler Akteur ist das Cornell Engineering Living Materials Institute (ELMI)[Institute, 2026 #1696], eine koordinierte Initiative der Cornell University, die Forschende verschiedener Disziplinen in einem gemeinsamen Forschungsrahmen zusammenführt. Die thematischen Schwerpunkte von ELMI umfassen unter anderem: adaptive, sensorbasierte Wearables, Strahlenschutz, Oberflächenfunktionen zur Vermeidung von Biofouling, Detektion und Minderung von Gefahrenstoffen in der Luft, Erkennung von mikrobiellen Verunreinigungen im Wasser, Kontrolle biologischen Wachstums, Biomining, bio-basierte Energieumwandlung und Energienutzung, ELMI wird durch die National Science Foundation und das Office of Naval Research gefördert.

Ein weiteres Beispiel NSF-unterstützter Forschungsinfrastrukturen ist das Materials Research Science and Engineering Center (MRSEC)[California, 2025 #1697] an der University of California, San Diego. Innerhalb des Zentrums widmet sich eine der Interdisciplinary Research Groups (IRG) explizit dem Themenfeld Engineered Living Materials.

Die NSF hat zudem eigene Förderlinien eingerichtet. Im Jahr 2021 initiierte sie das Programm Engineered Living Systems (ELiS) unter der Ausschreibung NSF 21-615 [Foundation, 2021 #1698]: Emerging Frontiers in Research and Innovation (EFRI). Das Programm war gekoppelt an den Track Brain-inspired Dynamics for Engineering Energy-Efficient Circuits and Artificial Intelligence (BRAID); für beide Bereiche standen zusammen 60 Millionen US-Dollar für zwei Jahre zur Verfügung. Für die Jahre 2022 und 2023 waren etwa 15 Projekte mit einer Laufzeit von jeweils vier Jahren vorgesehen.

Das ELiS-Thema war direkt auf Engineered Living Materials ausgerichtet und konzentrierte sich auf drei Anwendungsfelder: nachhaltige gebaute sowie sichere gebaute Umwelt, nachhaltige Rückgewinnung und Versorgung mit kritischen Materialien.

Im Mittelpunkt stand die Integration lebender Zellen, Organismen, Pflanzen und Nanobiohybride in technische Systeme, die Funktionen ermöglichen, die mit

konventionellen Materialien nicht erreichbar sind – darunter Selbstreplikation, Selbstregulation, Selbstheilung und adaptive Umweltreaktionen.

Demgegenüber führte die jüngere Ausschreibung NSF 24-508 (EFRI 2024/25) [Foundation, 2023 #1699] eine neue Forschungsrichtung ein: Biocomputing through Engineering Organoid Intelligence (BEGIN OI), versehen mit einem Budget von 30 Millionen US-Dollar und jährlich 7–8 geförderten Projekten in den Jahren 2024 und 2025, jeweils mit einer Dauer von vier Jahren. Dieser Ansatz geht über Engineered Living Materials im engeren Sinne hinaus und fokussiert auf grundlegende und transformative Forschung an Organoid-Systemen, die dynamische Informationsverarbeitung ermöglichen und Schnittstellen zu nicht-lebenden Systemen bilden. Der Begriff „Organoid“ umfasst hierbei ein breites Spektrum dreidimensionaler zellbasierter Konstrukte – inklusive mikro-physiologischer Modelle und biotechnisch erzeugter Gewebe.

Ähnlich wie die Entwicklungen bei DARPA verdeutlichen auch die NSF-Initiativen, dass Engineered Living Materials Teil eines umfassenderen Forschungstrends hin zu funktionalem, konstruiertem lebenden Material sind, in dem sich materielle, biologische und informationstechnische Funktionen zunehmend verbinden. Die zugrundeliegende Vision – lebende Systeme zu nutzen, um Fähigkeiten jenseits konventioneller Materialien zu realisieren – bleibt dabei programmatisch wie institutionell konsistent bestehen.

Forschungslücken und Trends

Als besondere Trends in der aktuellen Forschung sind folgende Bereiche hervorzuheben:

- „hybride Modelle“: in verschiedenen Bereichen der angewandten Forschung sind hybride Modelle für die Arbeit mit Engineered Living Materials essentiell. Ein Beispiel dafür sind Multi-Konsortien (mehrere lebende Zellen), bei denen durch das Kombinieren von Pilz-Bakterien und Algen ein symbiotisches System entsteht. Auch in der medizinischen Forschung gibt es Bewegung in Richtung Modelle mit mehr als einem Zelltyp, was die Möglichkeiten der Anwendungen stark erhöht. Auch im Bereich Simulation, sind hybride Ansätze von großer Relevanz, so können etwa die lebenden Systeme so mit ausreichender Genauigkeit ohne zu hohen Rechenaufwand theoretisch dargestellt werden.
- „keeping them alive“: Es sind zahlreiche Anwendungen bekannt, für welche ELMs zur Synthese verwendet werden. Eine Herausforderung aber auch große Chance ist es, die adaptiven, lebenden Eigenschaften dieser Materialien aber auch während

der gesamten Zeit der Anwendung zu erhalten. Im Bausektor könnten das etwa Ziegel sein, die je nach Umgebungsbedingungen entsprechend Feuchtigkeit oder Wärme abgeben können. Ein anderes Beispiel ist die luftreinigende Wirkung von Beschichtungen für Gebäude. Während dies eine Langzeitfunktion der Materialien erfordern, sind im medizinischen Bereich die notwendigen Eigenschaften von kürzerer Dauer, z.B. für regenerative Medizin oder Anwendungen beim Arzneimitteltransport.

- „Strategien für ein Upscaling“: Als wesentliche Herausforderung für die Gruppe der ELMs wird immer wieder das Upscaling bei der Herstellung dieser Materialien genannt. Viele Entwickler sind auf dem Weg zur Skalierung, aber Geschäftsmodelle fehlen. Ressourcen wie European Scale Up Plant – Biobase Europe helfen beim Testen von Scale-Ups. Während 3D und auch 4D Druck als wichtige Herstellungsmethoden für ELMs identifiziert wurden, ist bei diesen Verfahren das genaue Upscaling noch unklar. Voraussichtlich muss die additive Fertigung hier stets auch mit Nachbearbeitungsschritten kombiniert werden, um die gewünschten Materialien zu erhalten.
- „Ausbau der Multifunktionalität“: immer wieder findet man in der Literatur oder im Austausch mit Expert:innen Ideen und Ansätze für neuartige Konzepte in der Materialanwendung, die durch Engineered Living Materials ermöglicht werden könnten. Durchbrüche in der Gewebetechnik, in der Biokatalyse, für Verpackungsmaterialien oder multifunktionale Beschichten sind nur einige Beispiele. Viele ELMs versprechen durch ihre vielseitigen Eigenschaften zudem reduzierte Wartung oder biologische Abbaubarkeit.

Die Arbeit in PEARL-Mat hat aufgezeigt, dass der Stand der Forschung und Entwicklung für die verschiedenen Arten von Engineered Living Materials je nach Bereich und Anwendungsfeld unterschiedlich weit fortgeschritten ist. Tabelle 24 fasst zusammen, in welchen Bereichen es bereits mehr Forschung und Entwicklung zu welchen Arten von ELMs (hier kategorisiert nach Art der Lebenskomponente, Zusammensetzung und Eigenschaften) gibt, und wo noch große Lücken bestehen.

Tabelle 24. Quantitative Bewertung des Stands der Forschung und Entwicklung für Engineered Living Materials (ELMs) in deren verschiedenen Klassen und (Anwendungs)Bereichen. Die Skalierung reicht von 7-8 zeigt sehr hohe Evidenz in der Literatur für diese Subthemen, über 4-6 für moderate F&E Aktivität, bis zu 1-3 für kaum Datenquellen und 0 für keine Datenquellen.

Thema/Attribut	Medizinische Anwendungen	Umweltanwendungen	Herstellungsverfahren	Sicherheit / Nachhaltigkeit	Safe-and-Sustainable-by-Design
Bakterielle ELMs	8	7	6	3	2
Pilz-/Pflanzen-ELMs	3	6	4	2	1
Hybrid-/Verbund-ELMs	5	4	7	2	2
Photosynthetische ELMs	1	5	2	1	0
Gesellschaftlich/Regulatorisch	2	2	1	3	5

4.4 Engineered Living Materials Fokus Österreich

Marktanalyse, relevante Sektoren und Anwendungsfelder

Bisher sind keine kommerziellen Produkte, die explizit als „Engineered Living Materials“ (ELM) deklariert sind, am Markt. Erste Forschungs- und Pilot-Materialien wie Mycelium-basierte Baustoffkomponenten oder lebende Beschichtungen existieren zwar, werden aber noch nicht im großflächig vermarktet. Materialien mit lebenden Zellen oder bio-funktionellen Komponenten, z. B. selbstheilende Materialien, adaptive Beschichtungen sind in den meisten Fällen noch oft im Forschungs- oder Prototypstadium.

Aus den schon realisierten und angedachten Anwendungen für ELMs wurden folgende relevante Sektoren identifiziert:

- 1) Gesundheit/Medizin
- 2) Ernährung
- 3) Umweltbereich
- 4) Bausektor
- 5) Elektronik
- 6) Energie
- 7) Mobilität

Im Stakeholder-Workshop wurde über eine Abstimmung die Relevanz dieser verschiedenen Märkte und Sektoren für die beiden Materialgruppen von den Expert:innen bewertet, siehe Abbildung 28. Hier bekamen die Sektoren Gesundheit/Medizin und Elektronik deutlich die größte Zustimmung. Als weitere relevante Märkte wurden im Workshop zudem genannt: Quantenmarkt (für 2D Materialien), Metall (Um)Formung, Luftfahrt und Militär.

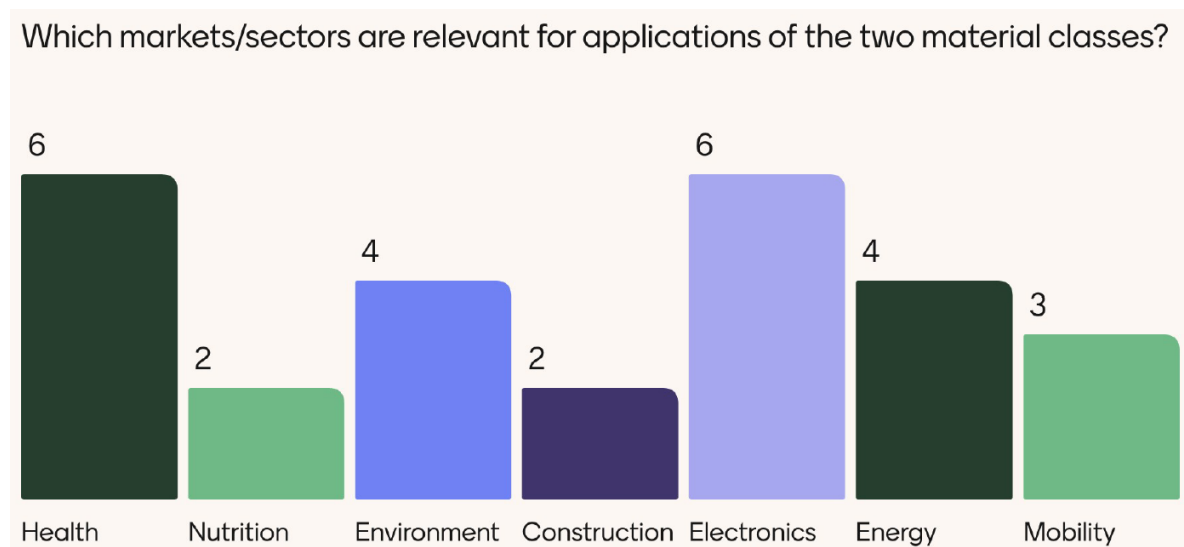


Abbildung 28. Adressierte Märkte und Sektoren der beiden Materialgruppen.

Weitere spezialisierte Anwendungsfelder wurden in den Expert:innen-Interviews und im Stakeholder-Workshop diskutiert, siehe Kapitel 2.1 und 3.

Geistiges Eigentum

Patente

In Österreich wurden keine spezifischen Patente zu Engineered Living Materials identifiziert. Es wurden folgende Websites durchsucht: <https://see-ip.patentamt.at/> und <https://www.oesterreich.gv.at/de/>. Dabei gab es keine relevanten Ergebnisse für die Schlagwörter „engineered living materials“, „living materials“, „Lebendmaterialien“ oder „lebendes Material“.

Österreich hat kürzlich eine Gesetzesänderung vorgenommen, die die Patentierbarkeit von „lebenden Organismen“ bzw. bestimmten Verfahren einschränkt. In Österreich gibt es keinen Patentschutz für jede Form der konventionellen Züchtung. (Patentamt, 2023)

Die genaue Formulierung Ausnahmen von Patentierbarkeit und Ausnahmen von der Patentierbarkeit sind online zu finden. (Ges.m.b.H., 2023)

Außerhalb Österreichs wurde ein US Patent „Engineered Living Materials“ zu biomineralisiertem Material mit photosynthetischen Mikroorganismen in Hydrogelen zur Umwandlung von CaCl_2 (zu CaCO_3) gefunden. Er wurde 2022 eingereicht und 2024 veröffentlicht. (Justia, 2022) Der Bewerber ist UCL Business Ltd (London Greater London). (Justia, 2026)

Wissenschaftliche Arbeiten

Die wissenschaftlichen Arbeiten in und aus Österreich lassen sich in verschiedene Kategorien unterteilen. Neben Artikeln in Fachjournalen (siehe dazu Kapitel 1.4 in der Literaturrecherche) wurden folgende relevante Veröffentlichungen identifiziert:

- Akademische Arbeiten und Publikationen:
 - viel Publikationstätigkeit von TU Wien, Universität für angewandte Kunst Wien, TU Graz
 - Keine akademischen Arbeiten zu ELM oder Lebendmaterial identifiziert an: TUG, MedUni Graz, TUW, MedUni Wien, Uni für angew. Kunst Wien
 - BOKU: 1 Masterarbeit von 2025
 - viele verwandte Arbeiten, aber keine einheitliche Terminologie
- Weitere wissenschaftliche Publikationen:
 - „Engineered Living Materials I, II, III“ Dossiers des ITA

- Industrielle Veröffentlichungen (Markteinführung, Pressemitteilungen, Produktdatenblätter): Noch sehr limitiert im ELM-Bereich in Österreich
- Statistik Austria: keine spezifischen Daten zu Lebendmaterialien oder ELM

Regulatorische Barrieren

Die regulatorischen Barrieren für Engineered Living Materials sind stark abhängig vom Anwendungsfeld. Aus der Literaturrecherche und den Inputs aus den Expert:innen-Interviews wurde die Höhe der regulatorischen Barriere in den verschiedenen Anwendungen qualitativ abgeschätzt. Dabei wurden drei Sektoren untersucht: Gesundheits-, Ernährung- und Bausektor. Generell lässt sich ableiten, dass die regulatorischen Barrieren im Gesundheitssektor eher hoch einzuordnen sind, jedoch für Ernährung in der Anwendung z.B. für Künstliches Fleisch mittel. Für den Bausektor ist dies sehr von der entsprechenden Anwendung abhängig. Während für Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen, beispielsweise zum UV-Schutz oder zur Luftverbesserung, die Barrieren eher niedrig eingeschätzt werden, sind für tragende Elemente, also z.B. der Ersatz von herkömmlichen Ziegeln, die Normen und Auflagen für Materialien viel höher und eine große standardisierte Datenmenge über die neuen Materialien muss zur Verfügung stehen, bevor konventionelle Materialien hier ersetzt werden können.

Tabelle 25. Einschätzung der regulatorischen Barriere für Engineered Living Materials in verschiedenen Anwendungen in den 3 Sektoren Gesundheit, Ernährung und Bau.

Gesundheitssektor	Regulatorische Barriere
Anwendungen für Mikrobiom	Hoch
Wundheilung	Mittel
Arzneimittelabgabe	Mittel
Ersatz von Tierversuchen	Hoch
Ernährung	
Künstliches Fleisch	Mittel
Bausektor	
Oberflächenbehandlung	Niedrig
Beschichtungen	Mittel
Tragende Elemente	Hoch

Hauptakteure in Österreich

Aus der bestehenden Recherche wurde eine Liste (siehe Tabelle 26) mit relevanten Playern in Österreich erstellt. Während die Start-Up Szene und die Industrie zu Engineered Living Materials noch im Wachsen begriffen ist, gibt es forschungsseitig bereits etablierte Gruppen. Vor allem die technischen Universitäten in Österreich sind hier stark vertreten, aber auch die medizinischen Universitäten etwa in Innsbruck und Graz haben bereits relevante Aktivitäten zu Engineered Living Materials vorzuweisen.

Tabelle 26. Relevante Akteur:innen zu Engineered Living Materials in Österreich.

Institution	Typ	Leitung/Person	Kernexpertise	Position in Innovationskette	TRL Schätzung
TU Wien – Institut für Angewandte Physik	Universität	Ille Gebeshuber	Biomaterialien, Biohybrid Materialien, Myzel/lebende Materialien	Grundlagen-/Forschung	2-4
MedUni Graz / Forschung Otto Loewi Forschungszentrum	Universität	Sebastian Schwaminger	Scaffolds für zelluläres Wachstum (beides wird hier modifiziert, Bakterienauswahl), Pilzzellen und humane Zellen wachsen lassen	Grundlagen-/Forschung	2-3
Organoid® Technologies GmbH	Industrie / KMU	Christoph Egger	Nachhaltige Materialien mit natürlichen Rohstoffen (nicht klassisch ELM, aber Materialinnovation)	Anwendung & Markt	6-8
EcoMycel (Wien)	Start-up (Bau / Myzel)	Gründer: Nándor Albert, Tobias Figlmüller	Myzel-basierte Dämmplatten aus Agrar-Reststoffen, Ziel: kreislauffähige, klimafreundliche Bau-Dämmstoffe.	Material-R&D, Pilotplatten, frühe Industrie-Pilotprojekte	3-4
Univ. Innsbruck – MUSE „MyceliUm SEat“	Universität	Integratives Design, Projekt MUSE-Team	Myzel-basierte Verbundwerkstoffe für Möbel / Innenausbau; robuste, alltags-	Materialentwicklung, Design-Demo, Prototypen	3-4

			taugliche myzelbasierte Materialien.		
Univ. Innsbruck – Integratives Design (Architektur)	Universität	Leitung Integratives Design (Architektur)	„Grown materials“ in Architektur, Experimente mit Myzel-Kompositen, Maßstabsversuche und Prototypen.	Frühphase Materialkataloge, architektonische Anwendung	2–3
TU Wien – Architektur / „Myzelium“-Projekte	Universität	z.B. Philipp Eversmann, Jan Wurm, Dirk Hebel (Gast/Koop)	Grundlagen zu Myzel als strukturbildendem Material, Steuerung von Porosität, Festigkeit, Bio-Verbundwerkstoffen.	Konzeptstudien, experimentelle Bauteile	2–3
FUNGATERIA (EU-Projekt mit AT-Partnern)	EU-Forschungsverbund	Konsortium, inkl. AT-Partner (z.B. TU Wien)	Co-kultivierte Pilz-/Bakterien-Systeme, myzelbasierte ELM-Portfolios (Selbstheilung, Schadstoffabbau usw.).	Plattform-Forschung	2–3
Akribes Biomedical (Wien)	KMU (Biotech/Health)	z.B. Dr. Barbara Wolff-Winiski, Prof. Anton Stütz	Präzisionsmedizin für chronische Wunden; ex vivo-Assays mit menschlichem Material, Alternativen zu Tierversuchen.	Assay-Plattform, Wirkstoff-Discovery, präklinische Validierung	3–4
MedUni Wien / Univ. Graz / MedUni Innsbruck	Universitäten	Wundheilung & Tissue Engineering, Dermatologie, Regenerationsmedizin	Bioaktive Wundauflagen, 3D-Hautmodelle, teilweise Mikrobiom-/Zell-basierte Ansätze, Ersatz von Tierversuchen.	Präklinische Modelle, translational orientierte Forschung	2–4
Österreichische Biotech-Szene Mikrobiom (versch. Firmen, AT-Standorte)	Industrie (Health/Mikrobiom)	lokale F&E-Leads	Mikrobiom-gerichtete Therapien, z.B. probiotische oder zellbasierte Ansätze, teils in Kombination mit Biomaterialien.	Späte Präklinik, erste klinische Phasen	4–6

BOKU Wien – Institute für Holzforschung / Werkstoffe	Universität	Professur für Holz- technologie / Biobasierte Werkstoffe	Biobasierte Verbundwerkstoffe, Holz-Komposite, Substrat-Know-how für Myzel-basierte Bauteile und Beschichtungen.	Materialentwicklung, Testung bauphysikalischer Eigenschaften	3–5
TU Graz – Institute im Bereich Baustoffe / Nachhaltiges Bauen	Universität	Professur für Baustoffkunde, Bauphysik	Nachhaltige Baustoffe, zirkuläre Materialien; Myzel bisher eher als „emerging topic“, geeignet für Kooperationen mit Start-ups.	Bauteil-Tests, Norm-/Zulassungsrelevante Forschung	3–4

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die beiden sehr unterschiedlichen Materialgruppen ELM und 2DH zeigten überraschenderweise einige gemeinsame Anwendungsfelder, nämlich Sensoren, Verbundwerkstoffe im Bauwesen und Drug Delivery. Dennoch gibt es aktuell so gut wie keine Überschneidungen der beiden Forschungscommunities. Lediglich eine für 2DH interviewte Expertin in UK forscht auch an ELM. Beide Materialgruppen teilen die Trends nach Hochskalierung und dem Institutionalisieren von Netzwerken.

5.1 Handlungsempfehlungen aus der 2D Community

Potentiale von 2DH in Österreich

2D Materialien und deren Hybride haben in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen ein großes technisches und wirtschaftliches Potential. Die Möglichkeiten Eigenschaften gezielt auf kleinstem Raum und erstmals unabhängig voneinander einzustellen, wie thermische und elektrische Leitfähigkeit, gepaart mit der extrem großen Oberfläche haben ihr Potential in der Quantentechnologie gezeigt ebenso wie in der Energiespeicherung und -Erzeugung bis hin zu Schichten mit diversen Funktionalitäten und biotechnologischen Anwendungen. In allen diesem Bereichen sind Aktivitäten in Österreich vorhanden. Auch das wirtschaftliche Wachstumspotential von 30% mit einem prognostizierten Marktanteil in Europa von über USD 20 Milliarden in 2030 zeigt die enorme wirtschaftliche Chance für Österreich. Da derzeit alle Anwendungsbereiche und 2D Materialgruppen boomen, besteht die Schwierigkeit für Österreich in der Fokussierung.

Österreich hat eine gut ausgeformte Grundlagen-Forschungslandschaft im Bereich der 2D Material **Charakterisierung und der Synthese** und deckt mit Graphenderivaten, MXenen, h-BN und TMC (vor allem MoS₂) die wichtigsten 2D Materialgruppen ab. Durch den Fokus vieler Gruppen auf Grundlagenphänomene und/oder Synthese sind die Verknüpfungen zu potentiell vielen Anwendungsbereichen möglich.

Österreichs Vorreiterrolle in der **Quantentechnologie** könnte mit der Intensivierung der Forschung rund um 2D Materialien in diesem Bereich weiter ausgebaut werden. Dies betrifft Anwendungsgebiete in der Sensorik von Quantenemittern und Komponenten von

photonischen Quantennetzwerken. Letztere helfen physikalische Limits der bestehenden Siliziumwafer zu überwinden. 2D Materialien schaffen im Quantenbereich skalierbare Systeme, die sowohl für Chipfertigung als auch hochauflösende Sensoren essentiell sind. Österreich hat mit Infineon, AT&S und IMS Nanofabrication weltweit führenden Unternehmen, die in eine 2D Materialien Förderlandschaft eingebunden werden sollten. Jedoch gilt es ein abgestimmtes Vorgehen zu erarbeiten, das die europäischen Forschungsnetzwerke wie Chip Joint Undertaking und dem European Quantum Industry Consortium berücksichtigt. Österreich kann hier als der Enabler fungieren und wissenschaftliche Grundlagenforschung auf hohem Niveau beitragen. Die wirtschaftliche Masse der Chip-Großvolumenproduktion ist weitgehend von US und China abgedeckt. In Europa haben Spanien, Belgien und UK hier führende Rollen.

Der Bereich der **Sensoren** hat in Österreich in unterschiedlichen Anwendungsbereichen ein großes Potential: hochauflösende Temperatur- oder Magentsensoren, Luftqualität und Gassensorik, optische und photonische Sensoren und elektrochemische und Biosensoren. Die österreichische Forschungslandschaft mit einem Fokus auf Grenzflächenphysik und High End Charakterisierungsexpertise und österreichische Firmen bieten exzellente Grundvoraussetzungen für einen Ausbau der Sensorexpertise mit 2D Materialien wie z.B. Graphen-Hybriden und h-BN, was sich gut in die österreichische Photonik Roadmap einordnet.

Eine weiteres spezifisches Potential stellen funktionale Schichten dar, wobei speziell die Nische der **Tribologie** in Österreich überproportional stark vertreten ist und daher für 2D Materialien in Österreich als relevant angesehen werden kann. Anwendungsbereiche werden in schmierstofffreien Systemen für die Luft- und Raumfahrt oder auch im Tiefziehen gesehen aber auch 2D Materialien als Zusätze in Schmierstoffen.

Die Expertise im Bereich **Funktionelle Schichten** ist in Österreich vielfältig ausgeprägt und 2D Materialien können unterschiedlichste Anwendungsbereiche bedienen: z.B.(i) thermische Isolationsschichten für Elektronische Mikrobauerteile oder in Smart Fabrics, (ii) EM Abschirmung für Light-Weight Stealth-Anwendungen im Verteidigungsbereich oder Schutz von Menschen vor elektromagnetischer Strahlung, (iii) Detektion und Abbau von gesundheitsgefährlichen oder Umweltschädlichen Substanzen.

Natürlich hat auch der in Österreich vertretene **Batterieforschungsbereich** Potential 2D Materialien wie MXene und Graphen-Hybride einzubauen, um an der Langlebigkeit und

kürzeren Ladezyklen zu arbeiten. Hier kann zusammen mit der Forschung an grünen Syntheserouten für MXene eine Synergie innerhalb Österreichs hergestellt werden.

Österreich hat das Potential im Bereich der Systemintegration Nischen der High-tech-Komponentenfertigung zu besetzen. Dabei sollte keine Einschränkung auf eine spezifische Materialgruppe erfolgen, da jeweils die Anwendung den Bedarf für ein bestimmtes primär dominierendes physikalisches Phänomen vorgibt und damit das jeweils passende 2D Material. Dieser Zugang des Inverse Designs, ausgehend von den Target Properties, ist ein besonders für die 2D Materialien notwendiger Ansatz, um die Fülle an Optionen zu bewältigen.

Regulatorische Fragestellungen zu 2DH

Die aktuellen Regulatorien für 2D Materialien werden weitgehend als unzureichend bzw. unpassend empfunden. Der Bedarf an adaptierten Regulatorien kommt aus zwei Herangehensweisen: (i) Schutz der Umwelt, von Tieren und des Menschen vor Kontamination durch Inkorporation und/oder Langzeiteffekten (ii) der Bedarf nach technischer Vergleichbarkeit über Referenz und Benchmarktests.

Die Recherche und der Dialog mit Expert:innen zeigte, dass nicht pauschal das Risiko einer bestimmten Materialgruppe geregelt werden kann, sondern immer nur in Kombination mit ihrem jeweiligen Anwendungsfeld bzw. der spezifischen Phase in der Wertschöpfungskette. In geschlossenen elektronischen Bauteilkomponenten ist das Risiko nicht gleichzusetzen zu dem von Wearables. Die Gefahr der Inkorporation wird im Vergleich zu Nanomaterialien wegen des Aspect Ratios der 2D Plättchen meist als gering angesehen. Damit überwiegt ein vergleichsweise sorgloser Zugang unter manchen Forschern. Jedenfalls muss die Verwertung nach der Nutzungsphase und Optionen oder Schwierigkeiten im Recycling in Zukunft stärker mitgedacht werden. Das ist auch sinnvoll, um kritische Rohstoffe wie Titan auch über Recycling zu gewinnen und damit Lieferkettenabhängigkeiten zu reduzieren. Regulatorien können hierzu Entwicklungsarbeiten gezielt fördern. In Österreich könnte sich im Bereich Biotechnologeanwendungen auf Nano-Toxikologie und Biokompatibilitätsstudien spezialisieren.

Massnahmenkatalog aus der 2D Community

Österreich muss auf einen dezidierten Fokus im Bereich der 2D Materialien setzen, um bestehende Stärken auszubauen und neue Chancen dieses enormen Wachstumsmarktes wirtschaftlich zu nutzen.

Es braucht **institutionalisierte Vernetzungsprogramme**, die akademische und industrielle Stakeholder zusammenbringen. Austausch über aktuellen Stand der wissenschaftlichen und technologischen Erkenntnisse ist Grundvoraussetzung für die Industrie und genauso braucht die Wissenschaft ein klareres Bild über die industriellen Bedürfnisse. Ein nationales Netzwerk wie das SIO Graphen in Schweden, einem Land mit vergleichbarer Bevölkerung und BIP, kann dafür als Vorbild dienen. Auch haben EU Staaten mit 2D-Materialien-Führerschaft gezielt **spezialisierte Institutionen** auf ein definiertes Themenfeld ausgerichtet.

Unabhängig von der spezifischen 2D Materialgruppe oder dem Anwendungsfeld gilt: Der **Translation Gap** zwischen vielversprechenden 2D Materialien und real herstellbaren Produkten muss überwunden werden. Dazu ist gezielter Support entlang der gesamten Translationskette notwendig, gegebenenfalls in strukturellen Kooperationen mit Nachbarländern.

- Ausbau von und Zugang zu high-end Charakterisierung und operando Messungen
- Harmonisierte Testprotokolle und Referenzmaterialien, Interlabor Benchmarking
- Upscaling der Syntheseprozesse und Prototyping durch gemeinsame Nutzung von Pilotanlagen, sowie Integration in bestehende Herstellrouten und Applikationsrelevante Tests von Prototypen
- Förderprogramme die gezielt das „Valley of Death“ zwischen starken Laborperformance und fertigem Produkt überwinden. Dies braucht Unterstützung im Bereich Prozess-Engineering, Zuverlässigkeit, Lebensdauer Tests, Safety Assessment und wirtschaftliche Produktkostenanalyse.

5.2 Handlungsempfehlungen aus der ELM Community

Die beiden im Stakeholder Workshop genannten Best-Practice Beispiele sollten sich auch in Österreich gut implementieren lassen. Das sind zum einen fokussierte Zuschüsse für eine thematische Plattform zu ELMs, um Wissenschaftler aus Grundlagenforschung, angewandter Forschung und Industrie national zu verknüpfen und die Themen gemeinsam voranzutreiben und international einen Wettbewerbsvorteil zu gewinnen (Vergleich ATIMA Projekt zu Advanced Materials); zum anderen ist es eine interdisziplinäre „Meta Thinking Group“ (Beispiel von der KU Leuven), die sich auf zukünftige nachhaltige Materialien fokussiert und z.B. gezielte Eigenschaften vorantreibt wie etwa Kreislauffähigkeit.

Es ist zu begrüßen, dass das Thema Advanced Materials an Sichtbarkeit gewinnt und auch dessen enormes wirtschaftliches Potential erkannt wird. Trotzdem warnen Expert:innen davor, alles als „Advanced Material“ zu bezeichnen und auch in den Expert:innen-Interviews wurde deutlich, dass eine neue Definition mit klareren Abgrenzungen und Kriterien erforderlich ist.

Der größte Handlungsbedarf, um die Forschung, Entwicklung und Innovation voranzutreiben wird in verschiedenen Aspekten gesehen. Ein großer Punkt ist die Förderung der **Interdisziplinarität**, die bei der Materialentwicklung, Herstellung und Skalierung benötigt wird. Dies könnte einerseits durch die weitere Etablierung und Einführung interdisziplinärer Studiengänge und Ausbildungen erreicht werden, es müssen aber auch etwa die Begutachtungsprozesse für Forschungsanträge neu gedacht werden, um innovative Ideen und Konzepte wirklich zu erkennen und deren Plausibilität zu durchleuchten. Aufbauend auf die Interdisziplinarität ist auch eine **stärkere Kooperation zwischen Forschung und Industrie** erforderlich, um ELMs schneller und effizienter zur Marktreife zu bringen. Dies könnte durch gezielte Fördermaßnahmen oder den erleichterten Zugang zu Infrastruktur (z.B. für das Upscaling, Modellierungen etc.) ermöglicht werden.

In Bezug auf **Regulatorien und Richtlinien** wurden flexiblere Strukturen gewünscht, um innovative Ansätze nicht vorzeitig durch konservative Strukturen und Regulierungen (z. B. Tierversuche) zu behindern. Hier könnte eine klare Kommunikation darüber, welche Sicherheitsthemen bereits rechtlich geregelt sind (Chemikalien, Produktsicherheit etc.), sehr hilfreich sein. Das frühe Einbeziehen von politischen Entscheidungsträgern könnte

hier Abhilfe schaffen und eventuell auch zu einer Abkürzung von langwierigen Zertifizierungen, der Einführung von NAMs etc. führen.

Weitere Handlungsfelder wurden im Bereich der **Konsumentensicherheit** sowie einem generell verstärkten Fokus auf die **gesundheitlichen Auswirkungen von Materialien** erkannt. Dies sollte auch als Gegengewicht zu den treibenden Faktoren von Leistung und Wirtschaftlichkeit, Entscheidungen über förderbare Entwicklungen mitbeeinflussen. Vielfach wurde kritisiert, dass die aktuelle Förderungslandschaft in Österreich und Europa sehr „zerstreut“ in Bezug auf Themenkontinuität ist, was eine Entwicklung bis zur Marktreife stark erschwert. Eine gerichtete, langfristige Strategie, die von Seiten der Politik klare Ziele für die Materialforschung der nächsten Jahre definiert, etwa angelehnt an die Industriestrategie Österreich 2035 aber mit stärkerer Vernetzung zu innovativen Themen der Forschung und einer klaren Definition von benötigten Anwendungen, könnte das Bewusstsein für dieses Schlüsselthema erhöhen und helfen effiziente Modelle für finanzielle Unterstützung zu gestalten.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anwendungsbereich Elektronik.....	24
Tabelle 2: Anwendungsbereich Katalyse.....	25
Tabelle 3: Anwendungsbereich Energiespeicher	25
Tabelle 4: Anwendungsbereich Sensorik	26
Tabelle 5: Anwendungsbereich funktionelle Schutzschichten.....	26
Tabelle 6: Anwendungsbereich Biomedizin	26
Tabelle 7: Anwendungsbereich Umwelttechnologie, Membrantechnologie, Landwirtschaft	27
Tabelle 8. Auflistung der Anwendungen von Engineered Living Materials im Medizin- und Umweltbereich sowie für weitere Anwendungen. Die Ergebnisse aus der Literatur wurden durch Inhalte aus den Expert:innen-Interviews ergänzt.....	32
Tabelle 9. Zusammenfassung der Hauptkenntnisse aus der Literaturrecherche zu Engineered Living Materials.	37
Tabelle 10. Expert:innen, die an den Interviews zu Engineered Living Materials teilgenommen haben.	40
Tabelle 11. Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der ELM Expert:innen sowie die Sektoren der möglichen Anwendungen dieser.....	41
Tabelle 12. Produzenten von Engineered Living Materials und Materialien am Markt.....	42
Tabelle 13. Technische, systemische und Material-intrinsische Barrieren, denen Engineered Living Materials aktuell noch gegenüberstehen.....	44
Tabelle 14: Interviewteilnehmer der 2D Material Expert:innen.....	45
Tabelle 15: Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der 2DH Expert:innen mit von ihnen genannten möglichen Anwendungsbereichen	47
Tabelle 16. Liste der angemeldeten Teilnehmer:innen für den PEARL-Mat Stakeholder Workshop mit Angabe der Institution.....	52
Tabelle 17. Auflistung der Marktbedürfnisse die laut den Teilnehmenden von Engineered Living Materials und 2D+ Hybridmaterialien adressiert werden können.....	55
Tabelle 18. Gezieltes Potential der beiden Materialgruppen für Europa, sowohl für die Wirtschaft wie auch die Forschung.	56
Tabelle 19: Weltweit führende Unternehmen – Herstellung bzw. Anwendung von 2D Materialien	64
Tabelle 20: Pionierunternehmerin in Schweden und Schwedische Graphen Lieferanten ..	69
Tabelle 21: Schlüsselakteure in Österreich	74
Tabelle 22: Laufende FFG Forschungsprojekte zum Thema 2D Materials.....	77

Tabelle 23. Projekte zu Engineered Living Materials und deren Details in den USA seit 2017.....	81
Tabelle 24. Quantitative Bewertung des Stands der Forschung und Entwicklung für Engineered Living Materials (ELMs) in deren verschiedenen Klassen und (Anwendungs)Bereichen. Die Skalierung reicht von 7-8 zeigt sehr hohe Evidenz in der Literatur für diese Subthemen, über 4-6 für moderate F&E Aktivität, bis zu 1-3 für kaum Datenquellen und 0 für keine Datenquellen.....	87
Tabelle 25. Einschätzung der regulatorischen Barriere für Engineered Living Materials in verschiedenen Anwendungen in den 3 Sektoren Gesundheit, Ernährung und Bau.	90
Tabelle 26. Relevante Akteur:innen zu Engineered Living Materials in Österreich.....	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1- Ergebnisse der Web-of-Science Plattform für die Suche nach 2D Materialien (Stand 21. März 2026)	8
Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichungen in vertikalen Balken, linke vertikalen Achse: jährliche Anzahl, rechts Achse: kumulativen Häufigkeiten.	8
Abbildung 3: Eine Netzwerkdarstellung einer 2D VOS Karte mit den Begriffen der Anwendungsfelder von 2D Materialien am Beispiel der Veröffentlichungsdaten aus 2024.	10
Abbildung 4: Dichte Ansicht der VOS Karte anhand des Beispiels von im Jahr 2024 verwendeten Methoden, die in den Autoren Keyword verwendet wurden.....	11
Abbildung 5. Dichte VOS-Karte der Begriffe zu den 2D Materialgruppen im Jahr 2025	13
Abbildung 6: Dichte VOS-Karte der Begriffe zu den 2D Materialgruppen im Jahr 2020	14
Abbildung 7: Dichte Landkarte der Anwendungsbereiche von 2DH im Jahr 2025.....	15
Abbildung 8: Dichte Landkarte der Anwendungsbereiche von 2DH im Jahr 2020.....	16
Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung des Themas Sensoren	16
Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des Themas spintronics	17
Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des Themas watersplitting	17
Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung des Themas Entsalzung (desalination)	17
Abbildung 13: 2D Materialgruppen, die von den japanischen Autoren Taniguchi und Watanabe zwischen 2020 (blau) und 2023 (gelb) beforscht wurden.....	18
Abbildung 14: Länder in denen Kooperationspartner der Prof- Taniguchi und Prof. Watanabe liegen. Die USA (rotes Feld) kooperiert am häufigsten, Deutschland und Südkorea (gelbes Feld) ca. gleich intensiv und Österreich (blaues Feld) ist erkennbar.	19
Abbildung 15: Herstellprozess von MXenen (Quelle: https://www.safari-project.eu/mxenes/)	22
Abbildung 16: Herstellprozesse von Graphen und 2D Materialien (Quelle: https://graphene-flagship.eu/media/llujqj2r/a5-production-brochure-2022.pdf).....	23
Abbildung 17. Aufbau und Beispiele für Biologische ELMs und Hybrid Living Materials. Bearbeitet von (Lantada et al., 2022).....	29
Abbildung 18. Illustration eines Bottum-Up (links) und eines Top-Down (rechts) Verfahren zur Herstellung von ELMs. (Tiruvannamalai-Annamalai et al., 2014).....	30
Abbildung 19. Interview-Guideline für die Expert:inneninterviews.	38
Abbildung 20. Trends für Engineered Living Materials, die aus der Literaturrecherche bestimmt wurden, bewertet nach deren Übereinstimmung mit Meinung der Expert:innen.	53

Abbildung 21. Trends für 2D+ Hybridmaterialien, die aus der Literaturrecherche bestimmt wurden, bewertet nach deren Übereinstimmung mit Meinung der Expert:innen.	53
Abbildung 22. Abfrage der Relevanz verschiedener Kontrollinstrumente.	57
Abbildung 23. Feedback Grafik des Workshops.....	59
Abbildung 24: Weltweite Marktprognose von IDTechEx für 2D Materialien je nach Anwendungssektor. Abbildung entnommen aus https://www.idtechex.com/en/research-report/graphene-and-2d-materials/1121	63
Abbildung 25: Die Herkunftsländer der Koordinatoren von in 2025 laufenden 2DH EU Projekten	64
Abbildung 26: Graphene Flagship Partner nach Länderherkunft.	65
Abbildung 27: Technologie und Innovations-Roadmap des Graphene Flagships (https://graphene-flagship.eu/industrialisation/roadmap).....	66
Abbildung 28. Adressierte Märkte und Sektoren der beiden Materialgruppen.....	88

Literaturverzeichnis

Alakpa, E. V. (2021). Engineered living materials (May 4-7, 2021). EBioMedicine, 69, 103473. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2021.103473>

Allahbakhsh, A., Gadegaard, N., Ruiz, C. M., & Shavandi, A. (2024). Graphene-Based Engineered Living Materials. Small Methods, 8(1), 2300930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smt.202300930>

Altin-Yavuzarslan, G., Sadaba, N., Brooks, S. M., Alper, H. S., & Nelson, A. (2024). Engineered Living Material Bioreactors with Tunable Mechanical Properties using Vat Photopolymerization. Small, 20(22), e2306564. <https://doi.org/10.1002/sml.202306564>

Amaral, A. J. R. B., Tatiana; de Wever, Pieter; Fardim, Pedro; Gericke, Martin (2021). EPNOE, Research Roadmap 2040. <https://hal.science/hal-04720325v1>

An, B., Wang, Y., Huang, Y., Wang, X., Liu, Y., Xun, D., Church, G. M., Dai, Z., Yi, X., & Tang, T.-C. (2022). Engineered living materials for sustainability. Chemical Reviews, 123(5), 2349-2419.

Battelle Memorial Institute (2023). Battelle Working on Self-Repairing Concrete for DARPA. <https://inside.battelle.org/blog-details/battelle-working-on-self-repairing-concrete-for-darpa>

Dai, Z., Yang, X., Wu, F., Wang, L., Xiang, K., Li, P., Lv, Q., Tang, J., Dohlman, A., Dai, L., Shen, X., & You, L. (2021). Living fabrication of functional semi-interpenetrating polymeric materials. Nat Commun, 12(1), 3422. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23812-7>

Dong, X., Wu, W., Pan, P., & Zhang, X. Z. (2025). Engineered Living Materials for Advanced Diseases Therapy. Adv Mater, 37(31), e2304963. <https://doi.org/10.1002/adma.202304963>

Dosier, M. (2019). bioMASON building with Nature. Retrieved 02 from https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/depssite/documents/webpage/deps_192710.pdf

Ebbesen, M., Korvink, J. G., Islam, M., & Lantada, A. D. (2024). The ethics of engineered living materials. *Trends Biotechnol*, 42(1), 5-9.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2023.09.004>

ECHA (2019) REACH. Guidance for Nanomaterials. Retrieved 27 Jan 2020 from
<https://echa.europa.eu/nl/-/get-ready-for-new-reach-requirements-for-nanomaterials>

Ecovative Design LLC (2017). Ecovative Design Awarded \$9.1 Million U.S. Department of Defense Research Contract to Develop & Scale a New Generation of Living Building Materials. Retrieved 02 from <https://grow.bio/blogs/press-releases/ecovative-design-awarded-9-1-million-u-s-department-of-defense-research-contract-to-develop-scale-a-new-generation-of-living-building-materials?>

Engineered Living Materials Institute (2026). Engineered Living Materials Institute Website. <https://elmi.cornell.edu/>

E. T. H. Zürich (2026). ALIVE | Advanced Engineering with Living Materials.
<https://map.ethz.ch/research/alive.html>

European Commission. (2021). Engineered Living Materials. Retrieved 09.12. from
https://cordis.europa.eu/programme/id/HORIZON_HORIZON-EIC-2021-PATHFINDERCHALLENGES-01-05

European Innovation Council and SMEs Executive Agency (2024). Pathfinder portfolio - Engineered living materials : overview of activities carried out in 2nd year of the portfolio and overview of activities planned for the 3rd year. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8ee02761-bdc0-11ef-91ed-01aa75ed71a1/language-en>

Deutsche Forschungsgemeinschaft (2026). Priority Programme “Engineered Living Materials with Adaptive. <https://www.dfg.de/de/aktuelles/neuigkeiten-themen/info-wissenschaft/2023/info-wissenschaft-23-45>

Foss Hansen, S. P., F.; Trier, X. . (2022). Smart materials and safe and sustainable-by-design — a feasibility and policy analysis. In M.-V. Florin (Ed.), Ensuring the environmental sustainability of emerging technologies. EPFL International Risk Governance Center.
<https://doi.org/10.5075/epfl-irgc-298445>

Gilbert, C., & Ellis, T. (2019). Biological Engineered Living Materials: Growing Functional Materials with Genetically Programmable Properties. *ACS Synth Biol*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00423>

Gilbert, C., Tang, T.-C., Ott, W., Dorr, B. A., Shaw, W. M., Sun, G. L., Lu, T. K., & Ellis, T. (2021). Living materials with programmable functionalities grown from engineered microbial co-cultures. *Nature Materials*, 20(5), 691-700. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00857-5>

Glairon, S. (2023). \$10M Department of Defense project for self-repairing concrete inspired by human vascular systems. <https://www.colorado.edu/ceae/2023/08/01/10m-department-defense-project-self-repairing-concrete-inspired-human-vascular-systems>

INM g GmbH (2026). Engineered Living Materials 2026 Conference. <https://livingmaterials.de/>

Guimarães, C. F., Soto, F., Wang, J., Akin, D., Reis, R. L., & Demirci, U. (2022). Engineered living bioassemblies for biomedical and functional material applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 77, 102756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102756>

Heveran, C. M., Gerlach, R., Hernandez, C. J., Intemann, K., Meyer, A. S., Ajo-Franklin, C., Charrier, M., Srubar, W. V., Joshi, N., Nelson, A., & Fields, M. W. (2024). Unlocking the societal potential of engineered living materials. *Matter*, 7(9), 2846-2858. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.07.011>

Heveran, C. M., & Hernandez, C. J. (2023). Make engineered living materials carry their weight. *Matter*, 6(11), 3705-3718. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.07.023>

Intemann, K. K., Lavoie, H. R., Elsass, K. D. A., Scott, B. G., & Gerlach, R. (2025). The Challenge of the Yuck Factor in Public Acceptance of Engineered Living Materials. *Glob Chall*, 9(6), 2400384. <https://doi.org/10.1002/gch2.202400384>

Jo, H., & Sim, S. (2022). Programmable Living Materials Constructed with the Dynamic Covalent Interface between Synthetic Polymers and Engineered *B. subtilis*. *ACS Appl Mater Interfaces*, 14(18), 20729-20738. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c03111>

Justia. (2022). Engineered Living Materials - Patent. Retrieved 10 from <https://patents.justia.com/patent/20240376501>

Justia. (2026). Patents Assigned to UCL BUSINESS LTD Retrieved 10 from <https://patents.justia.com/assignee/ucl-business-ltd>

Kang, S. Y., Pokhrel, A., Bratsch, S., Benson, J. J., Seo, S. O., Quin, M. B., Aksan, A., & Schmidt-Dannert, C. (2021). Engineering Bacillus subtilis for the formation of a durable living biocomposite material. Nat Commun, 12(1), 7133. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27467-2>

Kelvin Edem, B. (2024). From waste to wonder: Developing engineered nanomaterials for multifaceted applications. GSC Advanced Research and Reviews, 20(3), 109-123. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.3.0326>

Lantada, A. D., Korvink, J. G., & Islam, M. (2022). Taxonomy for engineered living materials. Cell Reports Physical Science, 3(4). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100807>

Lavrador, P., Gaspar, V. M., & Mano, J. F. (2021). Engineering mammalian living materials towards clinically relevant therapeutics. EBioMedicine, 74, 103717. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2021.103717>

Linde Verlag Ges.m.b.H. (2023). PatG (Patentgesetz) § 2. Ausnahmen von der Patentierbarkeit, BGBl. I Nr. 51/2023. Retrieved 10 from https://linda.lindeverlag.at/Dokument/77123_2/

Liu, X., Inda, M. E., Lai, Y., Lu, T. K., & Zhao, X. (2022). Engineered Living Hydrogels. Advanced Materials, 34(26), 2201326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202201326>

Luo, J., Chen, J., Huang, Y., You, L., & Dai, Z. (2023). Engineering living materials by synthetic biology. Biophysics Reviews, 4(1). <https://doi.org/10.1063/5.0115645>

McBee, R. M., Lucht, M., Mukhitov, N., Richardson, M., Srinivasan, T., Meng, D., Chen, H., Kaufman, A., Reitman, M., Munck, C., Schaak, D., Voigt, C., & Wang, H. H. (2022). Engineering living and regenerative fungal-bacterial biocomposite structures. Nat Mater, 21(4), 471-478. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01123-y>

Miserez, A., Yu, J., & Mohammadi, P. (2023). Protein-Based Biological Materials: Molecular Design and Artificial Production. *Chem Rev*, 123(5), 2049-2111.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00621>

Moon, T. S., & Yum, K. (2025). Integrating Engineered Living Materials with 3D Bioprinting. *Advanced Functional Materials*, 35(38), 2500934.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202500934>

Muñoz-Guamuro, G., Baños, M., Becker, J., & Weber, W. (2024). Engineered living materials: pushing the boundaries of materials sciences through biological engineering. *at - Automatisierungstechnik*, 72(7), 629-637. <https://doi.org/10.1515/auto-2023-0239>

National Science Foundation (2021). NSF 21-615: Emerging Frontiers in Research and Innovation (EFRI-2022/23). <https://www.nsf.gov/funding/opportunities/emerging-frontiers-research-innovation-efri-biocomputing/13708/nsf21-615/solicitation>

National Science Foundation (2023). NSF 24-508: Emerging Frontiers in Research and Innovation (EFRI-2024/25). <https://www.nsf.gov/funding/opportunities/emerging-frontiers-research-innovation-efri-biocomputing/13708/nsf24-508/solicitation>

Northeastern University (2026). The Joshi Lab - Biologically Fabricated Materials.
<https://neel-joshi.sites.northeastern.edu/>

Omer, R., Mohsin, M. Z., Mohsin, A., Mushtaq, B. S., Huang, X., Guo, M., Zhuang, Y., & Huang, J. (2022). Engineered Bacteria-Based Living Materials for Biotherapeutic Applications. *Front Bioeng Biotechnol*, 10, 870675.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870675>

Österreichisches Patentamt. (2023). Patentrechtsnovelle im Ministerrat beschlossen. Retrieved 10 from <https://www.patentamt.at/alle-news/artikel/patentrechtsnovelle-im-ministerrat-beschlossen#:~:text=Die%20Natur%20und%20ihre%20Pflanzen%20und%20Tiere%20k%C3%B6nnen,keinen%20Patentschutz%20f%C3%BCr%20jede%20Form%20der%20konventionellen%20Z%C3%BCchtung>

Pajerski, A. G., A. Černoša, I. Malat, J. Grzybek and A. Sandak. (2025). Towards a Safe-and-Sustainable-by-Design Framework for Engineered Living Materials. *Safe-and-*

Sustainable-by-Design (SSbD), Dübendorf, Switzerland. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17640428>

Palmett-Plata, O. (2019). Bioengineering materials and techniques. Journal of Physics: Conference Series(1257). <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/1257/1/012005>

Phintha, A., & Chaiyen, P. (2022). Rational and mechanistic approaches for improving biocatalyst performance. Chem Catalysis, 2(10), 2614-2643. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.09.026>

Regents of the University of California (2025). IRG 2: Engineered Living Materials. <https://mrsec.ucsd.edu/living-materials/>

Responsive Biomaterials Lab (2026). Responsive Biomaterials Lab. <https://warelab.engr.tamu.edu/>

Richard W. van Nieuwenhoven, & Florian Gisinger, L. H., Ille C. Gebeshuber. (2025a). Engineered Living Materials I. NanoTrustDossier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1553/ita-nt-064en>

Richard W. van Nieuwenhoven, & Florian Gisinger, L. H., Ille C. Gebeshuber. (2025b). Engineered Living Materials III Structure, Function, and Scale. NanoTrustDossier. <https://doi.org/https://epub.oeaw.ac.at/?arp=0x00407b61>

Rivera-Tarazona, L. K., Campbell, Z. T., & Ware, T. H. (2021). Stimuli-responsive engineered living materials. Soft Matter, 17(4), 785-809. <https://doi.org/10.1039/d0sm01905d>

Rivera-Tarazona, L. K., Shukla, T., Singh, K. A., Gaharwar, A. K., Campbell, Z. T., & Ware, T. H. (2021). 4D Printing of Engineered Living Materials. Advanced Functional Materials, 32(4). <https://doi.org/10.1002/adfm.202106843>

Rodrigo-Navarro, A., Sankaran, S., Dalby, M. J., del Campo, A., & Salmeron-Sanchez, M. (2021). Engineered living biomaterials. Nature Reviews Materials, 6(12), 1175-1190. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00350-8>

SPP2451. (2025). Schwerpunktprogramm Engineered Living Materials with Adaptive Functions <https://spp2451.de/research-projects/>

Srubar, W. V., III. (2021). Engineered Living Materials: Taxonomies and Emerging Trends. Trends in Biotechnology, 39(6), 574-583. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.10.009>

Sugianto, W., Altin-Yavuzarslan, G., Tickman, B. I., Kiattisewee, C., Yuan, S. F., Brooks, S. M., Wong, J., Alper, H. S., Nelson, A., & Carothers, J. M. (2023). Gene expression dynamics in input-responsive engineered living materials programmed for bioproduction. Mater Today Bio, 20, 100677. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100677>

Sun, Y., & Guo, Z. (2019). Recent advances of bioinspired functional materials with specific wettability: from nature and beyond nature [10.1039/C8NH00223A]. Nanoscale Horizons, 4(1), 52-76. <https://doi.org/10.1039/C8NH00223A>

Sundaram, L. S., Ajioka, J. W., & Molloy, J. C. (2023). Synthetic biology regulation in Europe: containment, release and beyond. Synthetic Biology, 8(1). <https://doi.org/10.1093/synbio/ysad009>

Tang, T.-C., An, B., Huang, Y., Vasikaran, S., Wang, Y., Jiang, X., Lu, T. K., & Zhong, C. (2021). Materials design by synthetic biology. Nature Reviews Materials, 6(4), 332-350. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00265-w>

Tiruvannamalai-Annamalai, R., Armant, D. R., & Matthew, H. W. (2014). A glycosaminoglycan based, modular tissue scaffold system for rapid assembly of perfusable, high cell density, engineered tissues. PLoS One, 9(1), e84287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084287>

University of Colorado at Boulder / Department of Civil, E., and Architectural Engineering. (2026). Living Materials Laboratory. <https://livingmaterialslab.org/>

USAspending.gov. (2020). Definitive Contract between Department of Defense and QUANTITATIVE BIOSCIENCES, INC. Retrieved 02 from [https://www.usaspending.gov/award/CONT_AWD_HR001118C0034_9700_-NONE- -NONE-](https://www.usaspending.gov/award/CONT_AWD_HR001118C0034_9700_-NONE_-NONE-)

USAspending.gov. (2022). Definitive Contract between Department of Defense and BIOMASON INC.

https://www.usaspending.gov/award/CONT_AWD_HR001117C0077_9700_-NONE_-NONE-

USAspending.gov. (2023). Cooperative Agreement between Department of Defense and THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF COLORADO. Retrieved 02 from

https://www.usaspending.gov/award/ASST_NON_HR00111720039_097

USAspending.gov. (2026a). Cooperative Agreement between Department of Defense and California Institute of Technology Retrieved 02 from

https://www.usaspending.gov/award/ASST_NON_HR00111720037_097

USAspending.gov. (2026b). Definitive Contract PIID 140D0423C0021.

https://www.usaspending.gov/award/CONT_AWD_140D0423C0021_1406_-NONE_-NONE-

Wang, Y., Liu, Y., Li, J., Chen, Y., Liu, S., & Zhong, C. (2022). Engineered living materials (ELMs) design: From function allocation to dynamic behavior modulation. *Curr Opin Chem Biol*, 70, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2022.102188>

Wang, Z., Lin, Z., Mei, X., Cai, L., Lin, K.-C., Rodríguez, J. F., Ye, Z., Parraguez, X. S., Guajardo, E. M., García Luna, P. C., Zhang, J. Y. J., & Zhang, Y. S. (2025). Engineered Living Systems Based on Gelatin: Design, Manufacturing, and Applications. *Advanced Materials*, 37(22), 2416260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202416260>

