

TARDS

Kunst, Architektur & Design

ABIO

im 21. Jahrhundert

LUMI-

S

Alberto T. Estevez (Hrsg.)

FUTURE

IBAC-Gesellschaft

Alberto T. Estévez (Hrsg.)

AUF DEM WEG ZU EINER BIOLUMINESCENTEN ZUKUNFT:
Kunst, Architektur & Design im 21. Jahrhundert

iBAG-UIC Barcelona, 2026
(Institut für Biodigitale Architektur & Genetik)
Universitat Internacional de Catalunya (UIC)
Immaculada, 22, 08017-Barcelona, Spanien
Tel. +34-932 541 800

www.geneticarchitectures.weebly.com www.uic.es

FRITZ UND TRUDE FORTMANN STIFTUNG FÜR
BAUKULTUR UND MATERIALIEN
Universitätsstraße 60, 44789 Bochum, Deutschland

www.fortmann-stiftung.de

© Alberto T. Estévez, Herausgeber
© Alle Texte, Projekte und Bilder sind Eigentum ihrer jeweiligen Urheber.

Titelbild: Alberto T. Estévez, *BioLumCity Landscape*, 2025

Diese Publikation geht auf das BioLumCity-Projekt unter der Leitung von Alberto T. Estévez zurück und von der Fritz und Trude Fortmann Stiftung für Baukultur und Materialien und dient zugleich als Katalog zur Ausstellung „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture & Design in the 21st Century“, die vom 21. bis 23. Januar 2026 an der UIC Barcelona stattfand.

Texte und Bilder sind Teil der Vorträge im Rahmen des Seminars „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture & Design in the 21st Century“, das am 21. Januar 2026 an der UIC Barcelona stattfand.

Er ist zudem Teil der Aktivitäten der Forschungsgruppe und Büro für genetische Architekturen sowie des Masterstudiengangs Biodigitale Architektur, die zusammen das iBAG-UIC Barcelona bilden.

Dieses Buch verdankt seine Dank an alle, die am BioLumCity-Projekt mitgewirkt haben.

Gedruckt in Spanien
ISBN: 979-13-991394-9-5
D.L. B 9593-2026

INHALT

4	Alberto T. Estévez BioLumCity-Projekt Zusammenfassung, Barcelona, 2023–2026	4
8	Alberto T. Estévez, Yomna K. Abdallah, Aranzazu Balfagón, Marta Serra BioLumCity-Projekt	8
64	Jae-Seong Yang CRAG-Gruppe BioLumCity-Projektbericht	64
80	Alberto T. Estévez Auf dem Weg zu einer biolumineszenten Zukunft	80

**BioLumCity-
Projekt**

Alberto T. Estévez

**Zusammenfassung
Barcelona, 2023–2026**

Das BioLumCity-Projekt unter der Leitung von Alberto T. Estévez ist die 6.Phase(2023–2026) des Genetic Barcelona-Projekts, das seit 2003 eine fortschrittliche und umsetzbare Integration echter Biolumineszenz in Architektur und Stadtgestaltung vorschlägt und dabei Biotechnologie, digitale Fertigung und ästhetische Forschung miteinander verbindet. Diese ^{sechste}Phase konzentriert sich zunächst auf natürlich vorkommende biolumineszente Organismen, insbesondere *Vibrio fischeri*, das aufgrund seiner relativen Intensität, Langlebigkeit und einfachen Implementierbarkeit in unbeleuchteten Innenräumen ausgewählt wurde. Um die intrinsischen Grenzen der bakteriellen Leuchtkraft und die durch die zeitgenössische Stadtbeleuchtung verursachten Wahrnehmungsprobleme zu überwinden, entwickelt die Forschung zudem ein genetisch verbessertes biolumineszentes System in der Mikroalge *Chlamydomonas reinhardtii*, das auf eine höhere Lichteffizienz und Umweltleistung abzielt.

Biolumineszente Organismen – sowohl nicht modifizierte Bakterien als auch gentechnisch veränderte Mikroalgen – sind in digital gefertigte, transparente, bioreceptive Paneele eingebettet, die von Objekten (Lampen, Möbel) bis hin zu architektonischen und städtischen Elementen (Ladenfronten, Fassaden) reichen. Diese Paneele wurden mithilfe bioinformierter Algorithmen entworfen und verkörpern Prinzipien der Harmonie, Kontinuität, Organizität, Komplexität und Fraktalität, wodurch sie auch bei Tageslicht, wenn die Lumineszenz nicht sichtbar ist, funktionale Leistungsfähigkeit und wahrnehmbare Ästhetik gewährleisten (zusammen mit Yomna K. Abdallah: Computational Design und Bioengineering).


Über einen Zeitraum von zwei Jahren führten iterative Experimente zur Optimierung der Nährmedien und zur positiven Selektion hochleuchtstarker Klone, die vom ursprünglichen Stamm *Vibrio fischeri* ES114 abstammen. Das daraus resultierende System erreicht eine anhaltende Leuchtkraft von fast 20 Tagen mit ausreichender Intensität, um Bewegungsräume für Menschen ohne künstliche Beleuchtung zu definieren (zusammen mit Aranzazu Balfagón und Marta Serra: Mikrobiologie und Genetik). Parallele genetische Forschungen führten einen biolumineszenten Stoffwechselweg aus Pilzen (HispS, H3H, Luz, CPH) mittels codonoptimierter synthetischer Gene in Mikroalgen ein, was die Aussicht auf eine autonome, photosynthetisch angetriebene Biolichtproduktion

in Kombination mit hoher CO₂-Fixierungskapazität und wertvoller Biomasseerzeugung (mit der CRAG-Gruppe von Jae-Seong Yang: Genetik). Das Projekt gipfelte in einer Ausstellung, einem Seminar und einer Publikation mit dem Titel „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture & Design in the 21st Century“ (21.–23.Januar 2026), in der Prototypen und Erkenntnisse zur Nachhaltigkeit vorgestellt wurden. Finanziert von der Fritz und Trude Fortmann-Stiftung treibt BioLumCity innovative Baukonzepte voran und schlägt einen Paradigmenwechsel hin zu regenerativen, lebendigen Lichtinfrastrukturen für das 21. Jahrhundert vor: **ein wahres Manifest, um den Menschen die Augen für die neuen Realitäten zu öffnen, die wir in unserer Zeit gestalten müssen.**




Die beiden Teams:
iBAG-UIC Barcelona
und CRAG.

FRITZ UND TRUDE FORTMANN-STIFTUNG
FÜR BAUKULTUR UND MATERIALIEN




BioLumCity


**Integrating Bioluminescence into
Architecture & Urban Design
for Sustainability**




**iBAG
UIC
BCN**




**GEN
ARQ
I+D**




**BIO
DIG
ARQ**



**GEN
ARQ
OFC**



**UIC
barcelona**



crag
CENTRE FOR RESEARCH
IN AGRICULTURAL GENOMICS

INSTITUTE FOR BIODIGITAL ARCHITECTURE & GENETICS - UIC Barcelona

Fotos: Alberto T. Estévez

TOWARDS A BIOLUMINESCENT FUTURE: ART, ARCHITECTURE & DESIGN IN 21ST CENTURY

SEMINAR / EXHIBITION

21st January 2026, 17:00 / 21st-23rd January 2026

BARCELONA 2026 WORLD CAPITAL OF ARCHITECTURE
GAUDÍ YEAR 2026: 100 ANNIVERSARY

FRITZ UND TRUDE FORTMANN-STIFTUNG
FÜR BAUKULTUR UND MATERIALIEN

INSTITUTE FOR BIODIGITAL ARCHITECTURE & GENETICS
IBAG- UIC Barcelona / CRAG
Universitat Internacional de Catalunya / Centre de Recerca en AgriGenòmica

UIC Saló de Grass Room, Street Immaculada, 22, 08017-Barcelona
biodigital@uic.es / www.biodigitalarchitecture.com



BioLumCity



Alberto T. Estévez, Plakat für das Seminar/die Ausstellung „Auf dem Weg in eine biolumineszente Zukunft: Kunst, Architektur und Design im 21. Jahrhundert“ (21.–23. Januar 2026), 2025 (mit einem Bild der 1 und Fotos der 6-Phase des Genetic Barcelona Project).

**BioLumCity-
Projekt**

Alberto T. Estévez
Yomna K. Abdallah
Aránzazu Balfagón
Marta Serra

Einleitung (Zusammenfassung)

Das BioLumCity-Projekt möchte eine fortschrittliche Methode zur Anwendung echter Biolumineszenz in Architektur und Stadtplanung anbieten. Zunächst werden die bereits vorhandenen natürlichen Quellen der Biolumineszenz berücksichtigt, wobei der für diesen Fall am besten geeignete lebende Organismus ausgewählt wird: biolumineszente Bakterien, die in unbeleuchteten Innenräumen ausreichend effektiv sind. Angesichts der Einschränkungen ihrer relativ schwachen Leuchtkraft und da das derzeitige künstliche Stadtlcht die Wahrnehmung von Biolumineszenz nicht zulässt, wird jedoch auch vorgeschlagen, eine genetische Modifikation an Mikroalgen vorzunehmen, um eine höhere Lichtausbeute zu erzielen. Andererseits werden sowohl genetisch veränderte als auch nicht veränderte Organismen, beide im Hinblick auf eine stärkere Beleuchtungswirkung, auf Paneelen unterschiedlicher Größenordnungen eingesetzt, von der Objektgröße über Lampen und Möbel bis hin zu Vitrinen, Ladenfronten, Schaufensterauslagen und Fassaden. Diese Paneele werden auf ganz besondere Weise digital gefertigt, unter Verwendung transparenter Materialien und bioinspirierter Algorithmen, wie wir sie aus unserem Designprozess gewohnt sind, um sowohl die funktionale Effizienz als auch die Wahrnehmung von Schönheit zu gewährleisten. So entstehen durch die digitale Designentwicklung die Paneele – in jeder Größenordnung – mit den Werten von Harmonie, Einheit, Kontinuität, Organik, Vielfalt, Dynamik, Komplexität und Fraktalität: den Werten einer „objektiven Schönheit“, die jedes Lebewesen in der Natur besitzt – Werte, die auch tagsüber sichtbar sind, wenn Biolumineszenz nicht wahrgenommen werden kann.

Wir haben daher einige 3D-Prototypen mit unveränderten, bereits existierenden biolumineszenten Bakterien – so wie sie heute verfügbar sind – erstellt, die in Architektur, Paneele, Möbel und Leuchten integriert sind. Auf der Suche nach den in Bezug auf die Biolumineszenz effizientesten Paneelen und nach eingehender Forschung dazu, wie die Haltbarkeit und die biolumineszente Effizienz der Bakterien verbessert werden können, können wir hier nun den Erfolg bei der Leuchtkraft kommentieren, den wir nach zahlreichen Experimenten mit Nährmedien und bei der Bakterienauswahl erzielt haben (Aufbau von *Vibrio fischeri* mit Variationen, um die Bedingungen für die Version mit der besten Effizienz zu ermitteln). Gleichzeitig haben wir tiefgreifendere Forschungen durchgeführt, darunter genetische Untersuchungen zur Biolumineszenz in Mikroalgen sowie einen Ansatz zur Biolumineszenz in Zierpflanzen.

Das heißt, kurz und bündig und wie geplant haben wir die Anwendung von *Vibrio fischeri* auf Paneelen unterschiedlicher Größenordnungen (Stadt und Haushalt) sowie eine Effizienzüberprüfung der Paneele durchgeführt. Wir haben zudem das digitale Design von bioreceptiven

Paneele und Prototypen in verschiedenen Maßstäben (Stadt und Haushalt) sowie die digitale 3D-Fertigung von bioreceptiven Paneelen und Prototypen in verschiedenen Maßstäben (Stadt und Haushalt) durchgeführt. All dies ist hier dokumentiert, auch mit einer Vielzahl von Fotos.

Somit lässt sich sagen, dass die endgültigen Versionen der bioreceptiven Paneele und Prototypen in verschiedenen Größenordnungen (Stadt und Haushalt: siehe Fotos der Paneele und Leuchten) sowie die beste Version hinsichtlich der maximal möglichen Wirksamkeit der Biolumineszenz von *Vibrio fischeri* – sowohl in Bezug auf die Intensität als auch auf die Dauer – zum heutigen Zeitpunkt als erreicht gelten. Es ist gelungen, dass sie ihre Leuchtkraft fast 20 Tage lang aufrechterhalten, mit ausreichender Intensität, um Räume und Bereiche ohne künstliches Licht für den menschlichen Fußgängerverkehr zu markieren.

Konkret haben wir einen Klon von *Vibrio fischeri* erhalten, der aus mehreren Selektionen der biolumineszentesten Kolonien während dieser zwei Jahre stammt, zusammen mit der Meeresbrühe unter optimalen Bedingungen (siehe Fotos). Der Stamm, mit dem wir gearbeitet haben, ist eine positive Selektion für Biolumineszenz, die wir in unserem Labor durchgeführt haben, ausgehend vom ursprünglichen *Vibrio fischeri*-Stamm ES114.

Die Wahl fiel zunächst auf biolumineszente Bakterien, da diese hinsichtlich Lichtintensität, Langlebigkeit sowie einfacher Installation und Wartung die effektivsten bereits existierenden natürlichen Organismen darstellen. Die Entscheidung für Mikroalgen fiel schließlich, da es sich um photosynthetische Organismen handelt, die eine deutlich höhere CO₂-Bindungseffizienz aufweisen als Landbäume und innerhalb desselben Volumens mehrere hundert Mal mehr CO₂-Gas absorbieren. Durch die Nutzung dieser Vorteile ist es unser Ziel, Mikroalgen und ein Ökosystem zu entwickeln, die in der Lage sind, Biolumineszenz sowohl zur CO₂-Bindung als auch zur Erzeugung von Biolicht zu erzeugen. Darüber hinaus ist die Biomasse von *Chlamydomonas reinhardtii* reich an Proteinen und Kohlenhydraten und enthält zudem nützliche Pigmente wie Chlorophyll und Carotinoide. Dies erhöht den wirtschaftlichen Wert der Biomasse dieser Mikroalgen erheblich.

System zur Verbesserung der Lichtausbeute. Um Biolumineszenz in Mikroalgen zu erzeugen, müssen wir externe Gene einbringen, die mit der Lumineszenz in Verbindung stehen, da Wildtyp-Mikroalgen die inhärente Fähigkeit für dieses Phänomen nicht besitzen. Wir nutzten den gut charakterisierten Biolumineszenz-Stoffwechselweg aus Pilzen, der

vier Moleküle und vier Enzyme (HispS, H3H, Luz und CPH). Konkret wandelt die Hispidin-Synthase (HispS), die Hispidin aus Kaffeesäure synthetisiert, das Enzym Hydroxylase (H3H) Hispidin in 3-Hydroxyhispidin um, das als Luciferin bekannt ist und anschließend durch das Enzym Luz oxidiert wird, was zu einer lichtproduzierenden Reaktion führt, die als Caffeoylpyruvat bezeichnet wird. Das entsprechende Decarboxylase-Enzym, CPH, regeneriert Koffeinsäure aus Caffeoylpyruvat. Während diese charakterisierten Gene jedoch bereits erfolgreich in höheren Pflanzen getestet wurden, wurden sie noch nicht in Mikroalgen getestet. Um ihre Expression in *Chlamydomonas* zu ermöglichen, haben wir daher synthetische Gene mit für Mikroalgen optimierten Codons erstellt. Das Jae-Seong Yang Lab des CRAG hat bereits starke Promotoren charakterisiert, die besser funktionieren als herkömmliche Promotoren, sodass wir eine hohe Expression des Systems erwarten. (Es ist nicht notwendig, hier in dieser einführenden Zusammenfassung die übrigen technischen Spezifikationen des Prozesses im Detail darzulegen).

Nachhaltigkeit. Das Projekt befasst sich mit mindestens 10 der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen, z. B. den Zielen 2, 4, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15 und 17:

ZIEL 2: Kein Hunger (Sicherung der Ernährung durch eine nachhaltige Algenlandwirtschaft). **ZIEL 4:** Hochwertige Bildung (Vermittlung hochwertiger Bildung zum Thema Nachhaltigkeit, Vermittlung dieser Inhalte an Studierende und Doktoranden der ESARQ-UIC Barcelona School of Architecture, um ihnen die Augen zu öffnen und ihren Horizont zu erweitern). **ZIEL 7:** Bezahlbare und saubere Energie (Entwicklung eines natürlichen, erneuerbaren und stromunabhängigen Beleuchtungssystems). **ZIEL 9:** Industrie, Innovation und Infrastruktur (Aufbau einer nachhaltigen, widerstandsfähigen Infrastruktur und Förderung von Innovation). **ZIEL 11:** Nachhaltige Städte und Gemeinden (Gestaltung von inklusiven, sicheren, widerstandsfähigen und nachhaltigen Städten und Siedlungen). **ZIEL 12:** Verantwortungsvoller Konsum und Produktion (Gewährleistung eines nachhaltigen Konsums natürlicher, nicht elektrischer und umweltfreundlicher Energie). **ZIEL 13:** Klimaschutz (Entwicklung von Maßnahmen und Produkten, die den Klimawandel und seine Auswirkungen bekämpfen). **ZIEL 14:** Leben unter Wasser (Förderung eines nachhaltigen Wasserökosystems für eine nachhaltige Entwicklung). **ZIEL 15:** Leben an Land (Förderung der nachhaltigen Nutzung terrestrischer Ökosysteme, Bekämpfung der Wüstenbildung sowie Eindämmung und Umkehrung der Bodendegradation und des Verlusts der biologischen Vielfalt). **ZIEL 17:** Partnerschaften zur Erreichung der Ziele (Stärkung der Mittel zur Umsetzung und Wiederbelebung der globalen Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung, in diesem Fall durch die Zusammenführung einer privaten Stiftung, einer privaten Universität und eines öffentlichen Forschungszentrums).

Den Abschluss bildeten die Ausstellung (21. - 23. Januar 2026), einem Seminar (21. Januar 2026) und diesem Buch „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture & Design in the 21st Century“ (auch online), das die Ergebnisse dieses Projekts mit Prototypen, Bildern und Erläuterungen zur Bedeutung der Biolumineszenz für die Nachhaltigkeit präsentiert. Die Bedeutung der Weitergabe und Verbreitung der Ergebnisse jeder Forschung oder Maßnahme wird von offiziellen Institutionen weithin anerkannt. Daher haben wir diese Ausstellung, dieses Seminar und dieses Buch mit Erläuterungen verschiedener Experten aus den Bereichen Biologie, Kunst, Architektur und Design vorbereitet. Organisiert an unserer Universität (Universitat Internacional de Catalunya) in Barcelona. Das Angebot kann auch verschiedenen Bildungseinrichtungen wie Kulturzentren, Schulen und Universitäten zur Verfügung gestellt werden. Das Buch kann weltweit an die wichtigsten Bibliotheken und Universitäten versandt und auf einer Buchwebsite zum Online-Kauf bereitgestellt werden, wie wir es bereits mit unserer Buchreihe tun. Auf Wunsch könnten die genetischen Forschungsergebnisse und Prototypen in Patente und eine kommerzielle Verwertung münden.

Dieses Forschungsprojekt, das seit 2023 vorbereitet wurde, wurde von der Fritz und Trude Fortmann-Stiftung für einen Zeitraum von zwei Jahren (Beginn Februar 2024 – Ende Januar 2026) freundlicherweise gefördert, nachdem es den entsprechenden öffentlich ausgeschriebenen Wettbewerb gewonnen hatte. Das Forschungsprojekt untermauert den Zweck der Stiftung, Forschung und Produktentwicklung im Bereich des Bauwesens durch effiziente Baustoff- und Baukonzepte zu fördern.

Daher möchten wir der Fritz-und-Trude-Fortmann-Stiftung unseren aufrichtigen Dank für ihre großzügige Unterstützung aussprechen. Dank dieser Förderung konnten wir unsere Forschungsergebnisse erfolgreich in einigen indexierten Fachzeitschriften, auf internationalen Kongressen und Ausstellungen veröffentlichen, wobei wir stets auf die Stiftung hingewiesen haben. Wir sind überzeugt, dass diese Beiträge die Förderung von Wissenschaft und Forschung im Bauwesen zur Förderung der Baukultur und der Baustoffe, wie es der Zweck der Stiftung ist, erheblich voranbringen werden. Es handelt sich zweifellos um eine sehr relevante Forschung, die **ein wahres Manifest ist, um den Menschen die Augen für die neuen Realitäten zu öffnen, die wir im 21. Jahrhundert gestalten müssen.**



Auf den folgenden Seiten wird die Arbeit der Gruppe um Alberto T. Estévez am iBAG-UIC Barcelona (Barcelona, Spanien) im Rahmen des BioLumCity-Projekts näher erläutert. Die Darstellung erfolgt in zwei Teilen: einem ersten allgemeinen Teil und einem zweiten Teil mit dem Titel „PANDORA-Projekt“, der als Teilbereich des BioLumCity-Projekts zu betrachten ist. Auf diese beiden Teile folgt in einem separaten Kapitel ein dritter Teil, in dem das BioLumCity-Projekt der Gruppe um Jae-Seong Yang am CRAG (Barcelona, Spanien) näher erläutert wird.

BioLumCity-Projekt: Integration von Biolumineszenz in Architektur und Stadtplanung für Nachhaltigkeit

Biolumineszenz integriert in Kunst, Architektur und Design für passive Beleuchtung in Städten der Zukunft

Leiter: Alberto T. Estévez

Problem: Die Abhängigkeit von nicht erneuerbaren und nicht nachhaltigen Energiequellen für die architektonische und städtische Beleuchtung.

Ziel: Fokus auf Anwendungen der Bioenergieforschung in der passiven Beleuchtung durch die Integration biolumineszenter bioaktiver Wirkstoffe (natürliche oder genetisch veränderte Bakterien, Hefen, Algen und Pflanzen) für die architektonische und städtische Beleuchtung.

Sekundäres Ziel 1: Steigerung der Effizienz der Biolumineszenzaktivität des natürlich biolumineszenten Bakteriums *Aliivibrio fischeri* hinsichtlich Lichtintensität, Dauer und einfacher Anwendbarkeit im architektonischen und städtebaulichen Maßstab (iBAG-UIC Barcelona).

Teilziel 2: Entwurf biorezeptiver architektonischer Elemente zur Aufnahme der natürlich biolumineszenten Bakterien *Aliivibrio fischeri* und Gewährleistung der Erschwinglichkeit, Verfügbarkeit, einfachen Implementierung und Wartung dieser Elemente mit Feststoff- und Suspensionsmedien (iBAG-UIC Barcelona).

Teilziel 3: Erzeugung biolumineszenter Zierpflanzen durch genetische Modifikation mittels Integration des Lux-Operons, um das autonome Wachstum, die Biolumineszenzaktivität und die Vermehrung dieser genetisch veränderten Pflanzen zu fördern: Pandora-Projekt (iBAG-UIC Barcelona / XTART).

Teilziel 4: Synthese biolumineszenter Bakterien, Hefen und Algen durch genetische Modifikation zur Beschleunigung der autonomen Vermehrung und zur Steigerung der Biolumineszenzintensität (CRAG).

Teilziel 5: Entwurf von Biobehältern als architektonische Elemente zur Aufnahme der gentechnisch veränderten Bakterien, Hefen und Algen, um die Erschwinglichkeit, Verfügbarkeit, einfache Implementierung und Wartung dieser Elemente zu gewährleisten: Flüssigphasenmedium (iBAG-UIC Barcelona).

Literaturübersicht

(Begründung, Analysen, gewonnene Erkenntnisse und definierte Entwicklungswege)

Aktuelle Forschungsansätze konzentrieren sich darauf, Nachhaltigkeit durch die intelligente Nutzung nicht erneuerbarer Energieressourcen und die Entwicklung neuartiger alternativer erneuerbarer Energiesysteme zu erreichen. Dies war in den letzten 25 Jahren einer der wichtigsten Forschungsschwerpunkte und ist es bis heute geblieben. Die meisten Quellen alternativer erneuerbarer Energien basieren in der Regel auf zentralisierten Energiemanagement-, Speicher- und Verteilungssystemen, wie sie in Solar-, Wind- und Wasserkraftwerken zu finden sind. Jedes dieser Systeme erfordert komplexe und nicht umweltfreundliche Fertigungsteile und Elektronik, deren Implementierung, Betrieb und Nutzung der erzeugten Energie Fachkenntnisse voraussetzen. Obwohl diese Systeme für groß angelegte kommerzielle architektonische und städtische Anwendungen, wie beispielsweise Fabriken, geeignet sein mögen, behindert die Komplexität dieser Systeme ihren Einsatz im privaten Bereich auf kleinerer Ebene für städtische und architektonische Zwecke. So berichtete beispielsweise eine Studie (Atasu et al., 2021) [1] von hohen Kosten für die Entsorgung von Solarpanel-Abfällen, was ökologische und wirtschaftliche Bedenken hinsichtlich der Entsorgung dieser nicht biologisch abbaubaren oder ökologisch unverdaulichen Abfälle aufwirft. Die Recyclingkosten für ein Panel beliefen sich in der Regel auf 20 bis 30 US-Dollar, im Vergleich zu Kosten von 1 bis 2 US-Dollar für die Deponierung desselben Panels. In ähnlicher Weise beschrieb Kuby Renewable Energy Ltd. (2019) [2] die Komponenten eines Standard-Solarmoduls und wies auf den hohen Energiebedarf bei der Herstellung der Siliziumhalbleiter sowie auf die Verwendung gefährlicher Chemikalien hin, die eine strenge Kontrolle im Herstellungsprozess erfordern. Ebenso ist Windkraft kostspielig, da aufgrund des hohen Lärmpegels und der Gefährdung der Tierwelt [3] abgelegene Anlagen gebaut werden müssen, und auch ihre Effizienz bei der Stromerzeugung ist fragwürdig [4]. Diese Defizite in Bezug auf Leistung, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Solar- und Windkraft haben vor allem zu einer Verlagerung hin zur Suche nach Bioenergie Lösungen geführt, beispielsweise moderner fester und flüssiger Bioenergie [5].

Die Entwicklung der Bioenergieforschung und ihrer Anwendungen umfasst vielfältige und sich ständig erweiternde Möglichkeiten, indem Biomasse in mikrobiellen Brennstoffzellen genutzt wird, um aus nicht pathogenen Mikrobenstämmen Licht und/oder Strom zu erzeugen. So wurden beispielsweise in den Jahren 2007–2008 die bakteriellen „Barcelona Biolamps“ von Alberto T. Estévez [6] eingesetzt, bei denen der Bakterienstamm *Aliivibrio fischeri* in Bioreaktoren verwendet wurde, um erstmals in der Geschichte eine Wohnung vollständig mit lebendem Licht zu beleuchten. Während Abdallah et al., 2019 [7], einen kathodisch immobilisierten, Laccase-sekretierenden, nicht pathogenen Pilzstamm *Aspergillus sydowii* NYKA 510 in einem

Eine einkammerige mikrobielle Brennstoffzelle erzeugte 0,76 V, 380 mA/m², 160 mW/m² und 0,4 W bei 2000 Ω; sie wurde später in einer autarken Beleuchtungseinheit eingesetzt, die zur Stromerzeugung ein System aus zwei Sätzen mit jeweils vier in Reihe geschalteten MFCs nutzte. Trotz der erfolgreichen Implementierung dieser durch Bakterien und Pilze betriebenen Geräte haben ihre nicht-photosynthetischen Eigenschaften die autonome Lebensdauer dieser Biobatterien oder Biolampen beeinträchtigt. Dies hat dazu geführt, dass der Fokus auf algenbetriebene Bioreaktoren zur Energieerzeugung als ganzheitliche nachhaltige Lösung gerichtet wurde, wobei die Vorteile nicht nur die Erzeugung von nachhaltiger, sich selbst erhaltender und autark erzeugter Bioelektrizität umfassen, sondern auch die Reduzierung von Kohlendioxid, die Produktion von Sauerstoff und industriell wertvollen Enzymen sowie sogar die Produktion von Nährstoffen wie Proteinen [8]. Dennoch konnten diese Flüssigbatterien die Komplexität der oben genannten Betriebs- und Wartungsprobleme nicht lösen. Die Einführung dieser nassen Flüssigbatteriesysteme, die mit lebenden Organismen arbeiten, die empfindlich auf ihre Umgebungsbedingungen reagieren, hat das Problem möglicherweise noch verkompliziert. Hinzu kommen ihre geringe Energieproduktion und die hohen Kosten für Elektrolytmembranen [9], was ihre architektonischen und städtebaulichen Anwendungen weiter einschränkt, wie in [10] berichtet wird, wobei die Kriterien für den Einsatz dieser bioaktiven Flüssigkeitssysteme in der Architektur und im Städtebau deren Lebenszyklus und Wartungsaufwand berücksichtigen und deren Energieausbeute in sinnvollen Anwendungen steigern müssen.

Daher zielte ein dritter Forschungsansatz darauf ab, die intrinsische Eigenschaft von biologisch erzeugtem Licht, die als „biolumineszente“ Aktivität bezeichnet wird, auf der Ebene der Materialstruktur umzusetzen. So entwickelten beispielsweise Mitiouchkina et al. (2020) [11] Tabaksorten, die ein biolumineszentes Pilzsystem exprimieren [12], welches die in allen Pflanzen vorhandene Kaffeesäure in Luciferin umwandelt und eine selbsttragende Lumineszenz erzeugt, die mit bloßem Auge gut sichtbar ist, um fluoreszierende und biolumineszente Gene in Pflanzen zu integrieren. Allerdings berücksichtigten solche Bemühungen keine architektonischen oder städtischen Anwendungen, indem sie die genetische Modifikation von Pflanzen oder Bäumen vorschlugen, die bereits wachsen oder im städtischen Maßstab eingesetzt werden können. Daher wurde im „Genetic Barcelona Project“ von Alberto T. Estévez ein einfacheres und nachhaltigeres Verfahren vorgeschlagen, bei dem Zitronenbäume genetisch so verändert wurden, dass sie autonom fluoreszieren. In einer ersten Phase (2003–2006) wurde dies bei sieben Zitronenbäumen erreicht, indem das GFP-Gen in ihre DNA eingeführt wurde, um eine erneuerbare, nachhaltige, autonome und passive Quelle für städtische Beleuchtung zu schaffen [13]. Diese genetisch veränderten Zitronenbäume blieben mehr als 13 Jahre lang am Leben und wären heute noch am Leben, wenn nicht die Notwendigkeit bestanden hätte, die Forschungsarbeit und ihre Infrastruktur an einen anderen Standort zu verlegen. Sie leuchteten nachts aktiv, trotz ihrer geringen Lichtintensität, die nur in völliger Dunkelheit wahrgenommen werden konnte. Diese Schritte weckten das Forschungsinteresse an der biologischen Herstellung neuartiger, fortschrittlicher biolumineszenter oder fluoreszierender Materialien.

So untersuchte beispielsweise eine Forschergruppe [14] die Idee der Herstellung einer biolumineszenten Mikroarchitektur und erforschte dabei den Einsatz von leuchtend fluoreszierenden Bakterien als Baumaterial, indem sie den 3D-Druck biolumineszenter Bakterien untersuchte. Das Projekt nutzte modernste 3D-Bioprinting-Technologien, um die Bakterienkultur und das Trägermedium mithilfe eines kollaborativen Roboters mit einem maßgeschneiderten Mikrodosierer herzustellen, um die Form des Mediums in architektonischem Maßstab zu realisieren. Die Machbarkeit einer Skalierung des Projekts auf Anwendungen im architektonischen Maßstab bleibt jedoch fraglich, da die komplexen biologischen Herstellungsprozesse nur unter strengen sterilen Bedingungen im Labor und unter fachkundiger Steuerung des empfindlichen Bioprinting-Prozesses durchgeführt werden können, was wiederum die Lebensfähigkeit der Bakterienzellen in der Kultur belastet. Dies ist auf den bekannten rheologischen Differenzeffekt vor, während und nach dem Druck zurückzuführen, der durch den Druck an der Extruderspitze des 3D-Bioprinters verursacht wird [15]. Zudem ist der Maßstab der entwickelten bakteriellen Bio-Tinte nicht anwendbar, da die Hydrogelbasis sich nicht selbst tragen kann, insbesondere wenn die Anzahl der 3D-gedruckten Schichten im architektonischen Maßstab zunimmt, was auf ihre schlechten rheologischen Eigenschaften zurückzuführen ist, die im berichteten Projekt nicht gemessen wurden. Darüber hinaus besteht möglicherweise die Notwendigkeit, diese berichtete Bio-Tinte zu vernetzen, um ihre Form nach dem Druck zu erhalten, was wiederum die Lebensfähigkeit der Zellen beeinträchtigen könnte. Hinzu kommt die mögliche Kontamination dieses biokompatiblen Hydrogels, was zur Koexistenz unerwünschter pathogener und schädlicher Bakterien- und Pilzstämme führen könnte. Doch das ist noch nicht alles: Die Durchführbarkeit der biolumineszenten Aktivität variiert definitiv über verschiedene Maßstäbe hinweg aufgrund der Abstände zwischen den Zellen, der Sauerstoff- und Nährstoffversorgung, der Zellmigration und der Signalübertragung. In ähnlicher Weise litten Projekte wie „Bioluminescent micro-architectures: Imprimer la lumière“ von Thomsen et al., 2020 und Tyse et al., 2022 [16,17], die biolumineszente Bakterienkulturen als architektonisches Material untersuchten, unter denselben Problemen der nicht realisierbaren Skalierbarkeit der vorgeschlagenen Materialien und Verfahren auf architektonischer Ebene. Trotz der Forschungsmerite hinsichtlich der Entwicklung von Computermodellen zur Simulation des Verhaltens, der Wachstumsraten und der Lebensdauer der vorgeschlagenen bakteriellen Materialien sowie der Berücksichtigung des Ökosystems, in dem die leuchtend fluoreszierenden Stoffwechselfvorgänge stattfinden, und ihrer begrenzten Lebensdauer besteht jedoch eine Abweichung zwischen den Computersimulationen und den lebenden Kulturen, wobei die größte Abweichung zwischen der Simulation und den realen Beobachtungen in den ersten Stunden aufgrund der Lag-Phase zu beobachten ist, die die Simulation nicht berücksichtigt. Zudem weisen die 3D-gedruckten Medien im Vergleich zu ihrem 3D-Modell Unvollkommenheiten auf, da die Dicke der extrudierten Medien nicht einheitlich ist. Daher müssen solche Spekulationen über eine unrealistische Hochskalierung vom Labormaßstab auf den architektonischen Maßstab neu bewertet werden. Die aktuelle Forschung zielt daher darauf ab, die große Lücke zwischen Forschungsprojekten mit ihren Mikromodellen im Pilotmaßstab und dem architektonischen Maßstab zu minimieren, indem das Anpassungs- und Anwendungspotenzial dieses bioaktiven Materials untersucht wird.

Die Einschränkungen dieses Ansatzes für 3D-gedruckte biolumineszente Biomaterialien machen es erforderlich, diese Bio-Tinten-Materialien hinsichtlich ihrer Rheologie, Biokompatibilität, Zellviabilität, Aktivität nach dem Druck, Zellmigration und ihres Verhaltens in einem für architektonische Anwendungen geeigneten Maßstab anzupassen und zu testen, bevor sie für architektonische Anwendungen vorgeschlagen werden können [18].

Technisch hergestellte biolumineszente Biomaterialien, die entweder einen natürlich biolumineszenten oder einen gentechnisch veränderten Organismus enthalten, gelten als der beste Ansatz zur Umsetzung biolumineszenter Aktivität auf Materialebene. Es gibt jedoch noch einige Aspekte zu klären, bevor diese bioaktiven Materialien in die gebaute Umwelt eingeführt werden, wo sie in direkten Kontakt mit Menschen kommen.

So müssen beispielsweise die spezifischen chemischen, physikalischen und physiologischen Eigenschaften der verwendeten biolumineszenten Mikrobenstämme verstanden werden, die sich hinsichtlich der Stimuli, der Intensität und der Dauer ihrer biolumineszenten Aktivität zwischen Bakterien, Pilzen und Algen unterscheiden. Zudem müssen die Pflege und das Zusammenleben dieser lebenden Materialien auf eine Weise erfolgen, die sowohl für den bioaktiven Wirkstoff als auch für die Nutzer sicher ist. Darüber hinaus sind die Grenzen der physikalischen Umsetzung und Morphogenese dieser lebenden Materialien in der gebauten Umwelt entscheidend, da ihre physikalischen Eigenschaften ihre physische Existenz und Funktionalität innerhalb der Umgebung bestimmen. Diese und weitere Aspekte müssen noch umfassend untersucht werden, bevor diese biolumineszenten Materialien in der architektonischen und städtischen gebauten Umwelt eingesetzt werden können. Daher können Gerüststrukturen einen möglichen dauerhaften und wiederauffüllbaren physikalischen Übergang zwischen bakterieller Bio-Tinte und ihrer Anwendungsumgebung bieten und ermöglichen so eine maßgeschneiderte, nachhaltige Einkapselung bioaktiver biolumineszenter Organismen.

Diese Gerüste für biolumineszente Bio-Tinte stammen aus dem Bereich der Gewebezüchtung, wo lebende Zellen oder Bio-Tinten auf Gerüste aufgebracht werden, die sowohl mit dem Verhalten der Zellen kompatibel sind als auch eine physikalische Form bieten, in der sich diese Zellen vermehren und differenzieren können, wodurch das gewünschte Gewebe entsteht [20]. Darüber hinaus ermöglichen sie einfachere, zuverlässigere Verfahren und eine leichtere Pflege dieser lebenden Kulturen als Bioreaktor-Anlagen.

Dieses maßgeschneiderte Gerüstdesign wurde in dem Forschungsartikel „3D-Printed Bioreceptive Tiles of Reaction-Diffusion (Gierer-Meinhardt Model)“ vorgeschlagen. [21] durch den Einsatz einer Mischkultur aus verschiedenen Algenstämmen – von fadenförmigen bis hin zu einzelligen Algen –, um ein dichtes Geflecht eines photosynthetischen, bioaktiven Gerüsts zu bilden, das das Überleben der biolumineszenten einzelligen Algen sichert, die auf einer 3D-gedruckten PLA-Platte ruhen. Obwohl diese Methoden erfolgreich dazu beitrugen, das Leben der biolumineszenten Algen zu erhalten, war die biolumineszente Aktivität gering und konnte mit bloßem Auge nicht wahrgenommen werden.

Auge. Daher besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, den biolumineszenten Bakterienstamm *Aliivibrio fischeri*, der hinsichtlich der Intensität und Dauer des emittierten biolumineszenten Lichts effizienter ist [22], in Form eines bioaktiven festen Mediums in Petrischalen (Biolampen) oder in Form einer auf ein PLA-Gerüst aufgetragenen Bio-Ink-Suspension zu integrieren, das das System beherbergen wird. Dieser Ansatz erleichtert die Umsetzung dieses Systems sowohl auf architektonischer als auch auf städtischer Ebene, da er nur einen minimalen einstufigen Wartungsaufwand erfordert, um diese biolumineszenten Feststoff-Slurry-Medienbehälter und -Kacheln mit neuem Medium aufzufüllen. Darüber hinaus können die bioreceptiven Paneele auf städtischer Ebene mit verschiedenen Einfassungsoptionen unter Verwendung von Ionenaustauschmembranen oder dichtem Polycarbonatglas integriert werden.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die Forschungsansätze zur Gewinnung von Biolight, die seit 2003 von Estévez (2005, 2006, 2007) [13] und später von Abdallah et al. (2019), Jaafari et al. (2021) Estevez und Abdallah, 2024, sowie Abdallah und Estévez, 2023 [7,8,19, 21], von 2019 bis 2024. Diese umfassen den Einsatz von biolumineszenten Bioreaktoren, genetisch veränderten Pflanzen mit dem GFP-Gen oder mit den für die Biolumineszenz verantwortlichen Genen von *Aliivibrio fischeri*, Bioelektrizität aus Pilzen und Algen in MFCs sowie Biolumineszenz-Panels, die durch Immobilisierung von natürlich biolumineszenten einzelligen Meeresalgen gewonnen werden, die in einer Kultur aus gemischten filamentösen Grünalgen eingeschlossen sind.

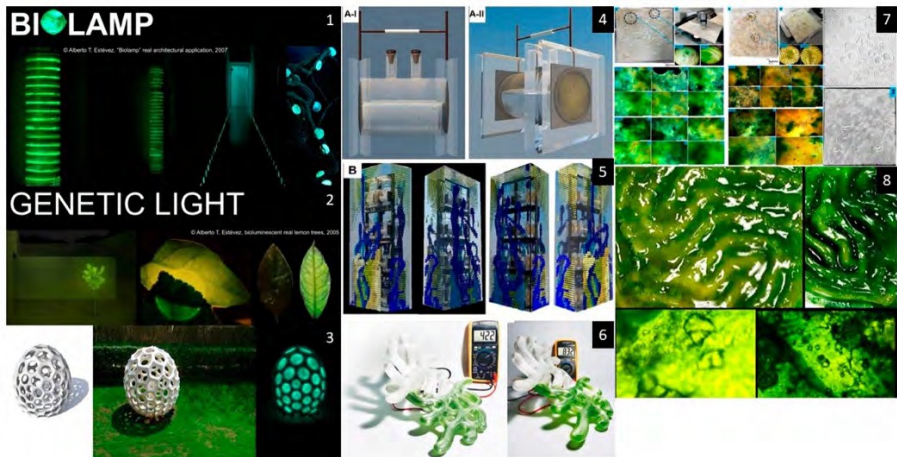


Abbildung 1. Bilder der Autoren zu verschiedenen Forschungsansätzen zur Entwicklung von Bio-Licht durch natürliche und genetisch veränderte Biolumineszenz- und Fluoreszenzaktivität, Bioelektrizität und Biolumineszenz-Symbiose auf architektonischen und städtischen Gerüsten: **1.** © Alberto T. Estévez, Biolamps (Genetic Barcelona Project, 2Phase, 2007–2010): Biolumineszente Batterien, eingesetzt in der Biolamp 2 (links), in einer Sockelleisten-Biolamp (Mitte) und in der Roots-Biolamp (rechts); das Foto wurde mit einer herkömmlichen Spiegelreflexkamera aufgenommen (menschliches Sehvermögen). **2.** © Alberto T. Estévez, Genetic

Barcelona-Projekt, 1-Phase, 2003–2006. Links: Bild aus dem Manifest, Licht von Bäumen, das mit GFP (grün fluoreszierendes Protein) erzeugt wurde. Genetische Erzeugung biolumineszenter Pflanzen für den städtischen und häuslichen Gebrauch. Vergleich zwischen einem Blatt eines Zitronenbaums mit GFP und einem Blatt ohne GFP derselben Zitronensorte. Mitte: Foto von Alberto T. Estévez mit einer herkömmlichen Spiegelreflexkamera; rechts: Foto von Alberto T. Estévez und Josep Clotet mit einer speziellen UV-Kamera. **3.** © Alberto T. Estévez, Barcelona Biodigital Pavilion, Barcelona, 2008–09. Nach einem „Bio-Lernprozess“ (in diesem Fall aus der mikroskopischen Strukturforchung an Radiolarien und Pollen) wurden CAD-CAM-Technologien zur direkten Herstellung realer Architektur im Maßstab 1:1 angewendet. Links: digitale Zeichnung; Mitte: reales Foto, direkt digital mit CNC gefertigt und tatsächlich in großem architektonischem Maßstab installiert; rechts: Abbildung einer Tischlampe mit Anwendung von Biolamps zur digitalen Fertigung mit einem 3D-Drucker im Maßstab kleiner Objekte. **4.** Entwurf einer Beleuchtungseinheit unter Verwendung von ACMSC-MFC mit *A. sydowii* NYKA 510. Zwei verschiedene Ansichten eines von [7] modellierten ACMSC-MFC (A-I und A-II). **5.** Kombiniertes Ansatz aus gemusterter, maßgeschneiderter Massenfertigung für den Entwurf einer Beleuchtungseinheit unter Verwendung eines ACMSC-MFC-Systems.

(B) Die endgültige Konstruktion einer autarken Beleuchtungseinheit, die von einer ACMSC-MFC gespeist wird, aus verschiedenen Blickwinkeln, entworfen von [7] unter Verwendung von Rhinoceros 3D+ Grasshopper. **6.** Eine auf photosynthetischen Algen basierende MFC, hergestellt von [8], die ausreichend elektrischen Strom für Haushaltsanwendungen erzeugt. **7.**, **8.** Dreidimensionale gedruckte bioreceptive Fliesen als Gerüste, die eine gemischte Algenkultur beherbergen, um eine Symbiose zwischen photosynthetischen fadenförmigen Grünalgen und einzelligen biolumineszenten Algen zu schaffen, die zwei reaktions-diffusionsbasierte, maßgeschneiderte Muster aufweisen, die in den bioreceptiven Fliesen eingesetzt werden, um die genauen Längen der typischerweise beherbergten Algenstämme über mehrere Skalen hinweg zu immobilisieren, begleitet von mikroskopischen Aufnahmen der auf den Fliesen immobilisierten Kulturen, die die Biolumineszenzaktivität des beherbergten biolumineszenten Algenstamms *Pyrocystis fusiformis* zeigen [21]. Von den Autoren.

Gewonnene Erkenntnisse und definierte Wege im BioLumCity-Projekt

1. Verwendung von *Aliivibrio fischeri* als natürlichem biolumineszentes Bioagent für die Integration in architektonische Elemente zur passiven Beleuchtung. Dank seiner dauerhaften Biolumineszenzaktivität in Bezug auf Intensität und Dauer. Hinzu kommen seine Sicherheit sowie die einfache Kultivierung und Pflege.
2. Der Einsatz von Fest-zu-Schlamm-Kulturmedien als langlebige und praktikable Methode zur Implementierung biolumineszenter Bakterienkulturen in architektonischen Elementen für die passive Beleuchtung. Dank ihrer Langlebigkeit, einfachen Wartung, unkomplizierten Anwendung und der freien mehrachsigen Ausrichtung ihres jeweiligen Wirts.
3. Der Einsatz von Slurry-Kulturmedien eröffnet neue Forschungswege für Biomaterialien auf der Basis von biotechnologisch hergestellten Bio-Tinten und maßgeschneiderten Gerüsten sowie für Methoden der Biofabrikation.

4. Die Integration genetisch veränderter biolumineszenter Pflanzen und Mikroorganismen in die gebaute Umwelt erfordert weitere Forschung zu ihrer Sicherheit, ihren Wechselwirkungen mit der Umwelt und ihrer Lebenszyklusanalyse.
5. Die Entwicklung von Biocontainern für flüssige Kulturmedien – sei es für natürliche oder genetisch veränderte Bakterien, Hefen oder Algen – unterliegt bei der Anwendung in der gebauten Umwelt größeren Einschränkungen aufgrund von Orientierungsbeschränkungen, der Notwendigkeit einer Einhausung und des komplexen Nachfüllprozesses.

Entlang dieser Hauptschwerpunkte erreichte das iBAG-UIC-Barcelona-Team die vier genannten Ziele wie folgt.

Methodik (Materialien und Methoden)

Das iBAG-UIC-Barcelona-Team verwaltete und erreichte die sekundären Ziele Nr. 1, 2, 3 und 5, während das sekundäre Ziel 4 vom CRAG-Team verwaltet wird.

Das erste und zweite sekundäre Ziel wurden parallel anhand der folgenden Schritte angegangen:

Schritt 1: Optimierung der Nährmedien für den natürlich biolumineszenten Bakterienstamm *Aliivibrio fischeri* CECT 524 in flüssigen und festen Medien (Petrischalen mit 10 cm und 15 cm Durchmesser) sowie in Suspensionsmedien (Hydrogel).

Insgesamt 15 ml des *Aliivibrio fischeri*-Stamms ES144/NCIMB1281 (*Aliivibrio fischeri* CECT 524) wurden in gefriergetrockneter Form vom CECT (Colección Española de Cultivos Tipo) bezogen. Zur Steigerung der Biolumineszenzaktivität von *Aliivibrio fischeri* wurden drei verschiedene Nährmedien getestet: Luria-Bertani-Bouillon (LB), LB-Bouillon und Lennox (Condalab) + Natriumchlorid AGR (Labkem). Die Meersalzkonzentrationen im LB-Medium wurden auf 15 %, 20 % und 25 % variiert und sowohl in einer Flüssigkultur als auch in einer Petrischalenkultur auf 10-cm-Platten, gemischt mit Agar, getestet (in dreifacher Ausfertigung). Tryptone-Soja-Bouillon (TSB) verwendete Dextrose als Kohlenstoffquelle, Natriumchlorid als osmotisches Ausgleichsmittel und Dikaliumphosphat als Puffer. Die Standard-Meeresbouillon (MB) enthielt Mineralien und Salze, die Meerwasser simulierten, sowie Pepton und Hefeextrakt als Stickstoffquellen. Die Salz- und Mineralstoffkonzentrationen wurden so angepasst, dass sie die Zusammensetzung von Meerwasser simulierten. Jedes der drei Kulturmedien wurde in flüssiger (150 ml/Kolben) und fester Form getestet, gemischt mit Agar-Agar BAC, das für Festigkeit sorgte und die Biolumineszenz des Organismus verlängerte. Die Petrischalen mit dem Medium und *Aliivibrio fischeri* CECT 524 wurden unter sterilen Bedingungen verschlossen und bei Raumtemperatur (25 °C) inkubiert, um das Koloniewachstum nach 24 Stunden zu fördern.

Stunden nach der Einbringung. Die Biolumineszenzaktivität wurde aktiviert und hielt sieben Tage lang an. Zur Überwachung der Biolumineszenz wurden eine Woche lang Beobachtungen in einer Dunkelkammer durchgeführt. Um das optimale Medium für den *Vibrio* zu ermitteln, wurde die optische Dichte (OD) gemessen, um die Bedingungen und die Dauer der Biolumineszenz der Bakterienkulturen unter den drei verschiedenen Medien zu vergleichen.

Optimierung der Kulturmedien für die biolumineszenten Stadtfliesen, die *Aliivibrio fischeri* CECT 524 in Bio-Tinte beherbergen

Die optimierten MB-Medien (Marine Broth) wurden mit vier verschiedenen Konzentrationen von MB (100 %, 50 %, 40 %) und 35 % Agar-Agar-BAC gemischt, um das Verhältnis von Medium zu Agar zu optimieren und eine Gel-Bio-Tinte für die Anwendung auf den städtischen Bildschirmplatten (Fliesen) herzustellen, wobei die Mediumdichte auf der Grundlage der Rückmeldung des Biolumineszenztests der *Aliivibrio fischeri* CECT 524-Kultur auf den Fliesen ausgeglichen wurde. Der pH-Wert der Medien wurde mit 1 M NaOH oder KOH auf pH 6, 7 und 8 eingestellt, und die Medien wurden 20 Minuten lang bei 121 °C autoklaviert und in dreifacher Ausfertigung in ein 47 °C warmes Wasserbad gestellt, um die Medien auf einer optimalen Temperatur zu halten und so eine Gelbildung zu verhindern. *Aliivibrio fischeri* CECT 524 wurde einzeln in jede Platte inokuliert. Unter Verwendung einer Mikropipette wurden 200 µl Glycerin-Stammlösung (hergestellt aus 50 % *Aliivibrio fischeri* CECT 524 und 50 % Glycerin) und 20 ml Marine-Bouillon mit Agar-Agar BAC in verschiedenen Konzentrationen bei 47 °C zugegeben, um ein Absterben der Organismen zu vermeiden.

Schritt 2: Biokompatibles Design und 3D-Druck des Gerüsts: die bioreceptive Stadtbildwand.

Das Gestaltungskonzept der städtischen Sichtschutzpaneele wurde ausgehend vom physikalisch-chemischen Feld als eine Form der Diffusion entwickelt, um die Integration eines Stammes biolumineszenter Bakterien, *Aliivibrio fischeri*, in die gebaute Umwelt zu erleichtern. Für den vorliegenden Entwurf wurden Feldattraktoren ausgewählt. Um verschiedene Topologien im Rahmen einer Gradientenmethodik zu untersuchen, ging diese Studie von lokalisierten zellulären Einschlüssen zu glatteren Gradiententopologien über, die durch das Feld erreicht werden, wie es in der Natur zu beobachten ist. Es wurden zwei Formfindungsschritte durchgeführt: Im ersten Schritt wurden diffusionsbasierte generative Entwurfsmodelle verwendet, um mehrere Entwurfsiterationen für die bioreceptiven Platten zu generieren, während im zweiten Schritt die Parameter der Formfindungsgleichung optimiert wurden, um eine kontinuierlichere Topologie zu entwickeln. Die Ergebnisse der Entwurfsformfindung flossen in die dritte Entwurfsphase der algorithmischen Anpassung ein, in der vier zusätzliche Entwurfsiterationen von 2D nach 3D rekonstruiert wurden. Die verwendeten Softwarepakete waren Rhinoceros 3D, Grasshopper und Scripting in Python. Im Anschluss an diese Phase wurde die Designiteration C2 für den 3D-Druck angepasst, indem parallele topologische Übergangsschritte (Kurven) hinzugefügt wurden, um das Einfangen der Bakterienkultur zu maximieren, was für die Aufrechterhaltung der Bakterienkultur entscheidend ist.

Lebensfähigkeit sowie die Steigerung der Biolumineszenzintensität und -dauer. Die modifizierte Version des C2-Entwurfmodells wurde als bioreceptive Kachel mit den Maßen 18 × 18 × 0,5 cm und einem rechteckigen Mikrostrukturaster von 0,1 × 0,1 cm im 3D-Druckverfahren hergestellt. Der 3D-Druck erfolgte mit einem Felix Tec 4-Ein-Kopf-3D-Drucker unter Verwendung von transluzentem PLA bei einer Druckkopf-temperatur von 210 °C und einer Druckbetttemperatur von 70 °C.

Beimpfung der städtischen Kacheln (3D-Kultur von biolumineszentem *Aliivibrio fischeri* CECT 524 in Sol-Gel-Bio-Tinte auf den 3D-gedruckten Gerüsten)

Drei 3D-gedruckte Stadtbild-Paneele (Kacheln) wurden in kleinere Stücke von jeweils 5 × 5 cm zerschnitten, und zwar in vier verschiedene Teile (P1, P2, P3 und P4), wobei ein rechteckiges 90°-Raster befolgt wurde, um sie in eine 15-cm-Petrischale einzupassen und die Biokompatibilität der unterschiedlichen Topologie des Fliesen-Designs im Hinblick auf die Steigerung der Biolumineszenzaktivität der aufgetragenen biolumineszenten Bio-Tinte von *Aliivibrio fischeri* CECT 524 zu bewerten. Die 3D-Platten wurden auf einer Kühlplatte (-32 °C) vorgekühlt und manuell mit einer serologischen Pipette mit dem *Aliivibrio fischeri*-Bio-Tinte beimpft, die zuvor in Marine Broth (MB) mit 40 % Agar bei 37 °C kultiviert worden war, um die Anhaftung der Bakterienzellen zunächst auf den mikrostrukturierten 3D-gedruckten Platten zu fördern. Anschließend wurde das Agarmedium über die Platten gegossen, um eine gleichmäßige Bedeckung der Strukturen zu gewährleisten. Das Medium wurde erstarren gelassen, bevor die Platten bei 26 °C inkubiert wurden.

Biolumineszenzaktivität dreidimensional gedruckter städtischer Sichtschutzplatten

Die kultivierten, 3D-gedruckten Platten (in Teilen), die mit dem für *Aliivibrio fischeri* + MB optimierten Bio-Tintenmedium beimpft worden waren, wurden in einer Dunkelkammer bei Raumtemperatur überwacht und mit einer LENS WIDE-Kamera unter folgenden Einstellungen aufgenommen: EV 0, ISO 4000, Belichtungszeit 20 s, F AUTO und WB 2200. Die beimpften 3D-gedruckten Plattenabschnitte (P1, P2, P3 und P4) wurden ohne Abdichtung im Petrischalenraum aufbewahrt. Bis zu 14 Tage nach der Beimpfung wurden Beobachtungen der Lichtemission durchgeführt, um die Intensität und Dauerhaftigkeit der Biolumineszenz zu bewerten.

Designvarianten der biolumineszenten bioreceptiven Platten

Die bioreceptiven Platten (Kacheln) wurden so bearbeitet, dass sie Designvarianten boten, indem feldbasierte Muster mit unterschiedlichen Wachstumsmustern angepasst wurden, was zu 3 verschiedenen Varianten führte, die mit demselben transluzenten PLA-Filament 3D-gedruckt wurden; zusätzlich wurden andere Farben der PLA-Filamente wie Weiß, Schwarz, Transparent und Blaugrün getestet. Jede dieser verschiedenen Farben des PLA-Filaments wurde hinsichtlich ihrer

Leuchtkraft und Reflektivität mit einem räumlichen Luminometer in einem vollständig abgedunkelten Raum gemessen, wobei alle verschiedenen Farben nach 3 Sekunden und bei Raumtemperatur 0,002 Lux aufwiesen, mit Ausnahme des schwarzen PLA-Filaments, das 0,

Ebenso wurden die verschiedenen Ausführungen des bioreceptiven Panels vor der Zugabe der biolumineszenten Bakterienkultur in einem dunklen Raum gemessen, um den Einfluss des Designs auf die Reflektivität und Leuchtkraft der Panels allein als Kontrollgruppe zu untersuchen. Dabei kam ein räumliches Luminometer zum Einsatz. Auch hier wiesen alle 3D-gedruckten Kacheln aus den verschiedenen PLA-Filamenten, einschließlich durchscheinender, transparenter, weißer und blaugrüner, einen Wert von 0,002 Lux auf, während die schwarzen 3D-gedruckten Kacheln einen Wert von 0 aufwiesen.

Schritt 3: Entwurf von Biolampen als Biobehälter für die *Aliivibrio fischeri*-Festkultur (Petrischalen).

Es wurde beschlossen, das Voronoi-Muster als 3D-Voronoi-Struktur der Biobehälter (Biocups) zu verwenden, um die optimierten Feststoffkulturen der biolumineszenten Bakterien *A. fischeri* aufzunehmen (5 Petrischalen pro Becher). Daher wurden die Abmessungen der Biocontainer auf der Grundlage der Standardabmessungen der Petrischalen festgelegt, um die Anpassung und Kommerzialisierung des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Biolamp-Designs zu erleichtern und zu standardisieren. Diese Abmessungen wurden so angepasst, dass sie zwei verschiedene Größen von Petrischalen aufnehmen können: 10 cm x 1 cm bzw. 14 cm x 1 cm. Jeder Biocup (Biolampe) ist für die Aufnahme von 5 Petrischalen ausgelegt, um die Wartung, das Nachfüllen von Nährstoffen und die Entsorgung von Abfällen zu erleichtern, während gleichzeitig eine ausreichende Lichtintensität pro Einheit gewährleistet ist, was auch die getrennte Wartung und Handhabung der biolumineszenten Kulturen ermöglicht. Diese Biocups oder Biocontainer wurden so konzipiert, dass sie um eine schlanke Edelstahlstange aus Edelstahl mit einer Höhe von 40 cm und einem Durchmesser von 2 cm montiert zu werden, um um diesen herum 5 Biocups (Biocontainer-Einheiten) in einer fraktalen Anordnung mit den fünf in jedem Biocup enthaltenen Petrischalen zu halten, wobei eine vollständig montierte Biolampe 25 Petrischalen umfasst, um eine verstärkte biolumineszente Lichtintensität zu bieten, die tatsächlich in architektonischen Innenräumen oder im städtischen Maßstab eingesetzt werden kann.

Das formale generative Design des Biocup durchlief mehrere Iterationen – bestehend aus 3D-Druck, Tests und Rückkopplungsschleifen –, um die Effizienz des maßgeschneiderten Voronoi-Designs zu prüfen. Ziel war es, eine größere und breitere Porosität zu erzielen, um das biolumineszente Licht der Biolampe zu maximieren, sowie den Materialverbrauch und die Produktionszeit zu reduzieren, um die Kosten der Massenproduktion zu kontrollieren und die Kommerzialisierbarkeit des Designs sicherzustellen; außerdem standen strukturelle Effizienz und Haltbarkeit im Fokus. Die wichtigsten Iterationen in dieser auf dem Voronoi-Muster basierenden Designfamilie waren vier Iterationen: V1, V2, V3 und V4. Die Variationen der Iterationen beruhten auf unterschiedlichen Verstärkungen zwischen doppel- oder einwandigen Voronoi-Strukturen, geraden oder geschwungenen Voronoi-Linien sowie massiven oder hohlen Voronoi-Rohren oder -Streben. Darüber hinaus wurden im

dem 3D-Druckverfahren getestet, wobei der Schwerpunkt auf transparenten und transluzenten Filamenten lag, um das von den in der Biolampe untergebrachten biolumineszenten Bakterienkulturen erzeugte Licht weiter zu maximieren.

Das Designkonzept wurde in Anlehnung an das Bochumer Gebäude der Fritz-und-Trude-Fortmann-Stiftung entwickelt; als zweite Variationsreihe wurde ein rechteckiges Gitter als Hauptmuster verwendet. Dieses Designkonzept umfasste zudem mehrere Iterationen, bei denen sowohl die Porosität und die Profilform der Gitterstreben als auch die Umschließung des Bodens der Biocups variiert wurden. Die Biocups wiesen genau die gleichen Abmessungen wie die Voronoi-Biocups auf, um der Funktion der Aufnahme der festen Kulturen der biolumineszenten Bakterien gerecht zu werden.

In der aktuellen Entwurfsphase werden verschiedene Designs für Biobecher, Kappen und mögliche Sockel entwickelt und getestet. Das Design der Kappen soll einen zusätzlichen Schutz für jeden Biobecher gewährleisten, während diese um die Stahlstange gedreht werden, um ein ungewolltes Verrutschen der darin befindlichen Petrischalen mit den festen biolumineszenten Bakterienkulturen zu vermeiden, da die Petrischalen nicht verschlossen sind. Das Design der Basis ermöglicht die hybride Integration der genetisch veränderten Pflanzen mit den biolumineszenten Genen in dasselbe Biolampen-Design, wo sie nicht nur Licht erzeugen, sondern auch Kohlendioxid verbrauchen und Sauerstoff produzieren, um eine ganzheitliche, nachhaltige biolumineszente Lösung vom architektonischen bis zum städtischen Maßstab zu schaffen.

Schritt 4: Entwurf von Biocontainern für die Flüssigkultur von natürlichen und genetisch veränderten biolumineszenten Bakterien, Hefen und Algen.

In diesem Schritt erforderten die Designkriterien für die Biobehälter eine hermetische Konstruktion, um die Flüssigkultur der genetisch veränderten biolumineszenten Algen und Bakterien einzuschließen.

Das Design des Biobehälters für Flüssigkulturen orientiert sich am anatomischen Modell des menschlichen Herzens und dient als Biobehälter für Biolumineszenz sowie als mikrobielle Brennstoffzelle zur Erzeugung von Bioelektrizität in einer Anlage im städtischen Maßstab. Damit soll der bedeutende multidisziplinäre Wert des Herzens nicht nur als emotionales und moralisches Symbol, sondern auch als effizientester Bioreaktor verdeutlicht und das Bewusstsein für nachhaltige, erneuerbare alternative Energiequellen geschärft werden.

Das Design folgt der vierkammerigen Morphologie des Herzens als biomimetische, vierkammerige mikrobielle Brennstoffzelle (MFC) unter Verwendung des biolumineszenten Bakterienstamms *Aliivibrio fischeri* CECT 524, wobei die Morphologie des Herzens die beste Biolumineszenz und Bioelektrizitätserzeugung erzielt. Dank des variierenden Oberflächen-Volumen-Verhältnisses, das im oberen Bereich der Herzform erhöht und im unteren Bereich verringert ist, wird im Falle der Bioelektrizität ein geringerer Widerstand der Lösung gegen den

im Falle der Bioelektrizität und eine verbesserte Sauerstoffdiffusion im Medium für eine bessere Biolumineszenzaktivität ermöglicht.

Das „Heart Shelter“-System bestand aus den „Heart Bricks“, bei denen 3D-gedruckte Rekonstruktionen von CT-gescanntem Trabekelknochen in Form eines Ziegels verwendet wurden, um darin jeden herzförmigen Biobehälter aufzunehmen.

Die Urban Heart Bioreaktoren: biomimetisches Bioreaktordesign für Biolumineszenz und Bioelektrizität

Trotz der Bedeutung biomimetischer Herzbioreaktoren in der regenerativen Medizin, der Gewebezüchtung und bei künstlichen Organen wurde unseres Wissens nach bisher noch nie ein biomimetisches Herzkonzept bei der Konstruktion einer mikrobiellen Brennstoffzelle oder eines Bioenergie-Bioreaktors eingesetzt. Daher stellten wir das Projekt „Urban Hearts Bioreactors“ erstmals auf der SiGraDi 2024-Konferenzausstellung vor, die im November 2024 an der Universität Internacional de Catalunya in Barcelona stattfand. Eine der ersten erstellten Visualisierungen des Projekts wurde als Hauptplakat der SiGraDi 2024-Konferenz verwendet, wobei das Herz als Symbol für das perfekte und ewig existierende intelligente Bioreaktorsystem diente, von dessen Funktion wir Menschen leben (Abbildung 13). Das Projekt wird zudem im Rahmen des von der Fritz und Trude Fortmann Stiftung geförderten Forschungsprojekts BioLumCity entwickelt, dessen Ziel die Entwicklung biolumineszenter Materialien und Systeme für Anwendungen in der Architektur und im städtischen Maßstab ist.

Betrachtet man das hochkomplexe und koordinierte System der menschlichen Herzanatomie und -funktion, lässt es sich in etwa mit einer Zweikammer-Brennstoffzelle vergleichen, wobei die linke und die rechte Herzkammer als Anoden- und Kathodenkammer einer Brennstoffzelle bezeichnet werden. Dabei wird das sauerstoffarme Blut, das als Abfallprodukt aus allen Körperorganen (mit Ausnahme der Lunge, wie oben beschrieben) gesammelt wird, durch ein Hilfssystem (die Lunge) gereinigt, und das aus der Lunge gesammelte sauerstoffreiche Blut wird wieder im gesamten Körper verteilt. Dies ist ein Beispiel für ein städtisches Herzsystem, das Abfälle aus dem gesamten städtischen Kontext (z. B. einem Wohnblock oder einem Stadtplatz) sammelt und diese als Wachstumsmedium für bestimmte verwendete Mikrobenstämme im Biocontainer und/oder MFC nutzt, um die benötigte Energie (Biolicht und/oder Bioelektrizität), Sauerstoff, Nahrung und industriell wertvolle Elemente zu produzieren und diese in diesen spezifischen städtischen Anwendungen in der Stadt wiederzuverteilen. Dies dient dem Kernziel der vorliegenden Arbeit, nämlich der nachhaltigen dezentralen Erzeugung von Biolicht und Bioelektrizität durch ein System, das passiv arbeitet und an jedem beliebigen Ort frei implementiert werden kann, um die Einschränkungen der zentralisierten Energieerzeugung und -verteilung zu überwinden. Da es bei Letzterer an der lokalen Steuerung des Netzwerks, der Stromverteilung und der Wartung mangelt, was zu generalisierten Stromausfällen führt

Stromausfälle (z. B. der großflächige Stromausfall, von dem Spanien, Portugal und Südfrankreich im April 2025 betroffen waren).

Um ein derart komplexes Modell (das menschliche Herz) jedoch im städtischen Maßstab als Brennstoffzelle anzuwenden, sind neben der Neukonzeption der herkömmlichen Brennstoffzelle auch eine Vereinfachung und Modifizierung des Modells unerlässlich. In einer MFC beeinflussen die Form und Konfiguration der Kammern maßgeblich den elektrischen Strom und die Gesamtleistung, indem sie Faktoren wie Sauerstoffdiffusion, Innenwiderstand, Elektrodenoberfläche und das Gleichgewicht zwischen anodischen und kathodischen Reaktionen beeinflussen [23]. Daher ist die typische Herzform die sinnvollste Wahl für die biomimetische Gestaltung von MFC-Kammern. Da die umgekehrte Kegelform des Herzens variiert, ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen am Boden verringert, um den Widerstand der Lösungen (Anolyt und Katholyt) gegenüber den Elektronen zu verringern, und am oberen Ende erhöht, das näher an der Brücke liegt, welche die Anode mit der Kathode und dem Draht verbindet, über den die Elektronen fließen; dies führt zu einer optimierten Leistung der MFC und einer höheren sowie stabileren elektrischen Stromabgabe. Darüber hinaus ist dieselbe Form des herzförmigen Biobehälters die sinnvollste für die biolumineszenten Bakterien, die Sauerstoff als Teil ihrer biolumineszenten enzymatischen Reaktion der Luciferin-Luciferase-Enzyme benötigen, um das Biolicht zu erzeugen. Das bedeutet, dass das größere Verhältnis von Oberfläche zu Volumen im oberen Teil des umgedrehten Konoids im herzförmigen Behälter zu einer besseren Sauerstoffdiffusion im Medium und einer besseren Biolumineszenzaktivität der biolumineszenten Bakterien in den oberen Schichten des Mediums beiträgt [24; 25]. Beispielsweise sind in einer mikrobiellen Brennstoffzelle (MFC) die beiden Kammern (Anode und Kathode) voneinander getrennt und entweder durch eine Salzbrücke oder durch eine Ionenaustauschmembran verbunden [26]; dies ähnelt im Wesentlichen der Funktion der Lunge beim Gasaustausch. Die Ionenaustauschmembran ist zwar für die Optimierung der Effizienz der MFC von Bedeutung, da sie die Salzbrücke bei der Polarisierung der Batterie ersetzt und Elektronen über die minimierte Strecke mit geringerem Widerstand überträgt. Aufgrund ihrer relativ hohen Kosten und geringeren Leistungsbeständigkeit – da sie aufgrund chemischer und physikalischer Veränderungen regelmäßig ausgetauscht werden muss [27] – wurde sie in der aktuellen Phase der „Urban Hearts“-Biobehälter/MFCs jedoch nicht als entscheidend für die Weiterleitung der erzeugten Elektronen oder Protonen von der Anode zur Kathode angesehen, um den elektrischen Strom zu akkumulieren [22; 18]. In ähnlicher Weise wurde das typische anatomische Modell des menschlichen Herzens vereinfacht, indem komplexe Teile wie die Arterien und das Pumpsystem sowie das zusätzliche Reinigungssystem, nämlich die Lunge, reduziert wurden. Dies bedeutet, dass eine MFC aus der detaillierten anatomischen Zusammensetzung des Herzens abgeleitet werden kann. Daher wandten die Autoren die folgenden Schritte an, um das Modell des menschlichen Herzens an das Modell der städtischen Biobehälter/MFCs anzupassen:

1. Die vier Kammern eines anatomischen Herzmodells wurden in vier herzförmige Biobehälter (20 x 20 x 20) umgesetzt

cm) wurden aus durchscheinendem und rotem, durchscheinendem PLA 3D-gedruckt (Abbildung 14) und miteinander verbunden (jeweils zwei Biobehälter wurden als Anode und Kathode der MFC miteinander verbunden). Diese Konfiguration ergab zwei MFC-Batterien mit flexibel wiederaufladbaren Biobehältern. Dies ermöglicht die Dualität der Biolumineszenz- und Bioelektrizitätsaktivität des Systems, das in der aktuellen Forschungsphase die biolumineszente Bakterienkultur *Aliivibrio fischeri* CECT 524 beherbergt. *Aliivibrio fischeri* CECT 524 ist nicht pathogen und kommt in der Natur bereits als Meeresbakterium vor; es lebt in Symbiose mit Meerestieren, sodass keine Gefahren bei seiner Verwendung bestehen [28]. Dennoch ermöglichen die vorgeschlagenen „Urban Hearts“-Bioreaktoren den flexiblen Einsatz einer breiten Palette von biolumineszierenden und/oder bioelektrische Energie erzeugenden Mikroorganismen wie Bakterien, Algen und Pilzen.

2. Die Arterien und Venen des menschlichen Herzmodells wurden als Einlass, Auslass und Verbindungsstück für den MFC in Silikonschläuchen (mit einem Durchmesser von 3 mm) nachgebildet, um die jeweilige Flüssigkeit in die entsprechende Kammer zu leiten. Diese Schläuche erleichtern zudem die Wiederaufladbarkeit der „Urban Hearts“-Bioreaktoren (MFC).
3. Ein Pumpsystem, das für die Funktion des menschlichen Herzmodells unerlässlich ist, wurde in den Bioreaktoren (MFCs) von „Urban Hearts“ nicht eingesetzt, da diese passiv arbeiten und auf den chemischen Reaktionen an Anode und Kathode basieren, um die Biolumineszenzaktivität auszulösen und/oder durch die Redoxreaktion oder die enzymatische Luciferin-Luciferase-Reaktion Bioelektrizität zu erzeugen.
4. Es wurde ein Trägersystem entworfen, um die Biobehälter zu halten und zu umschließen; dabei wurde das menschliche Herzmodell nachgeahmt, das im Brustkorb eingeschlossen ist. Daher entwarfen die Autoren die Unterbringung der „Urban Hearts“-Bioreaktoren, die auch deren physische Umsetzung im städtischen Kontext wie folgt verdeutlicht:

Der „Heart Shelter Brick“ (Abbildung 15) mit den Maßen 22 x 20 x 22 cm: Die Ziegel ähneln dem trabekulären Knochengewebe und verfügen über einen maßgeschneiderten Hohlraum, der den Herz-Biobehälter umschließt. Jeder „Heart Shelter Brick“ hat oben eine Öffnung, durch die die Schläuche geführt werden können (zum Befüllen, Entleeren und Verbinden des Biobehälters mit seinem Gegenstück, um die MFC zu bilden). Das Design des Herz-Schutz-Ziegels wurde anhand der 3D-Rekonstruktionen des mittels CT (Computertomographie) gescannten Rinderfemurknochens auf der Ebene des trabekulären Strukturmotivs entwickelt. Dies soll eine verbesserte mechanische Festigkeit des Ziegels gewährleisten und gleichzeitig eine poröse und leichte Struktur erzielen. Die 3D-Rekonstruktionen wurden mit Rhinoceros 3D + Grasshopper + Python an den Maßstab und die Größe des Herz-Bio-Containers angepasst.

Der Biobehälter in Trabekelknochenstruktur

Ein weiterer Entwurf für einen Bio-Container folgte einem biomimetischen Ansatz, der auf denselben Ergebnissen der Mikro-Computertomographie-Aufnahmen des Rinderfemurs basierte, die bereits für die Entwicklung der Herzschutzziegel herangezogen worden waren. Der Biocontainer entstand aus der Kombination der vertikalen Ausdehnung eines Rinderfemurs mit den trabekulären Perforationen auf einer Seite, um Befestigungspunkte für die Montage vieler Biocontainer-Einheiten zu schaffen sowie die Handhabung des Geräts zum Entleeren und Nachfüllen der biolumineszenten Kulturmedien zu erleichtern.

Der Entwurfsprozess basierte auf der Anpassung der Mikro-CT-3D-Rekonstruktionen des Rinderfemurs durch KI-gesteuerte 3D-Netzmodifikation in Rhinoceros 3D+ Grasshopper + Weaverbird-Plugin sowie der KI-Software Meshy. Ai. Der Entwurf wurde mit durchsichtigen und leuchtenden PLA-Filamenten und dem XL Felix 3D-Drucker in 3D gedruckt.

Abbildung 16 zeigt die 3D-gedruckten, knochenförmigen Biobehälter, die im Februar 2025 in der Ausstellung „Heart of Architecture“ an der Universität Internacional de Catalunya, Saló de Graus, Barcelona, ausgestellt wurden.

Ergebnisse der Schritte 1 und 2

Dreidimensional gedrucktes biokompatibles Gerüst: die Urban Screen Tile

In der ersten Entwurfsphase wurde das polar-periodische Reaktions-Diffusions-Muster mit dem Feldgradienteneffekt kombiniert. Die Ergebnisse dieser Phase beschränkten sich jedoch auf lokalisierte Muster der Zell-Einschließung, anstatt den erforderlichen sanften Gradientenübergang einer kontinuierlichen Topologie zu erzielen. Die aus dieser ersten Entwurfsphase resultierenden Muster wiesen Topologieunterbrechungen und getrennte Vertiefungen auf, die das für die Steigerung der Biolumineszenzintensität erforderliche Chemotaxis-Verhalten der Bakterienkultur behinderten. In der zweiten Entwurfsphase wurden mehrere Entwurfsiterationen von Feldmustern mit einer kontinuierlicheren Topologie erreicht, wie in Abbildung 2 (1, 2) dargestellt. Diese Ergebnisse der auf einer feldkontinuierlichen Topologie basierenden Muster flossen in die Phase der algorithmischen Anpassung des Designs ein (Abbildung 2 (3)) und führten zur Designiteration C2 (Abbildung 2 (4)), die als bioreceptive Fliese mit den Maßen $18 \times 18 \times 0,5$ cm und einem rechteckigen Mikrostrukturraaster von $0,1 \times 0,1$ cm 3D-gedruckt wurde, einschließlich der Hinzufügung von parallelen topologischen Übergangsstufen (Kurven) (Abbildung 2 (6)), um das Einfangen der Bakterienkultur zu maximieren und eine dichte Biofilmbildung zu ermöglichen, die die Lebensfähigkeit der Bakterienkultur aufrechterhält und deren Biolumineszenzintensität und -dauer erhöht.

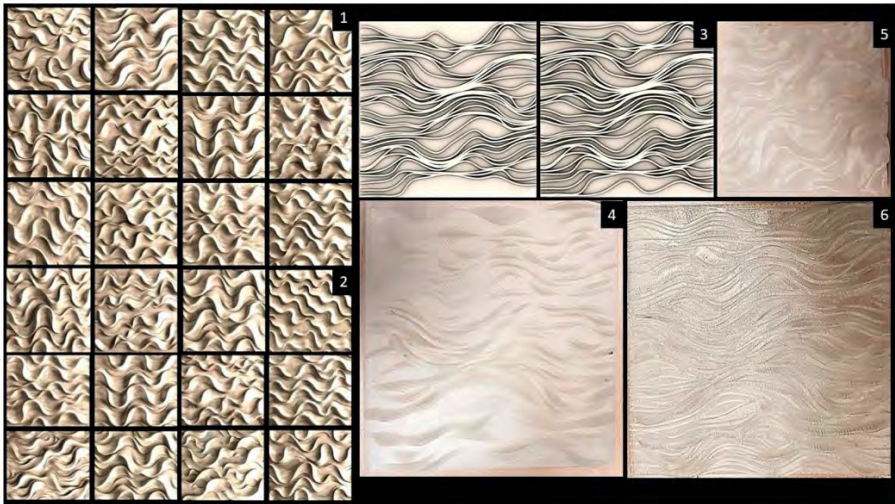


Abbildung 2. Der generative Entwurfsprozess für bioreceptive Kacheln auf Basis einer Feldtopologie zur Immobilisierung biolumineszenter Bakterien der Art *A. fischeri*. 1., 2. 26 verschiedene Entwurfsiterationen aus der zweiten Entwurfsphase, in der die Diffusionsparameter angepasst wurden, um einen fließenden und offenen topologischen Übergang im Feldmuster zu erzielen.

3. Das algorithmisch angepasste Design der bioreceptiven Kachel auf Basis des in Rhinoceros 3D, Grasshopper und Python entwickelten feldkontinuierlichen Topologiemusters, das sich durch ein dichtes kurvenförmiges Muster und eine kontinuierlichere Topologie auszeichnet, wodurch es sich als bioreceptive Oberfläche für biolumineszente Bakterien eignet. 4. Das 3D-gedruckte Design der bioreceptiven Fliese C2 und seine weiter verbesserte Version mit zusätzlichen gekrümmten Versätzen für eine verbesserte Einfassung der Bakterienkultur, wie in 6. dargestellt; die beiden Fliesen wurden aus transluzentem PLA mit einer Mikrostruktur aus einem rechteckigen Raster 3D-gedruckt: Jede Fliese hatte Abmessungen von $18 \times 18 \times 0,5$ cm. 5. Eine weitere Iteration von C2, bei der die Diffusionsparameter variiert wurden, um die Kurven zu kontinuierlichen Topologien zu verschmelzen; diese 3D-gedruckte Iteration wurde separat getestet und wird in einer zukünftigen Studie vorgestellt. Von den Autoren.

Wirtschaftliche Kompetenz sowie Einfassung und Montage in der gebauten Umwelt

Das Design der bioreceptiven Fliese eignet sich für die Massenproduktion unter Verwendung kostengünstiger 3D-Druckwerkzeuge und -materialien, wobei eine moderate Fertigungszeit von 4 Stunden und eine um 300 % erhöhte Druckgeschwindigkeit pro Fliese erforderlich sind. Um die Druckzeit pro Fliese durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit des 3D-Druckprozesses zu verkürzen und damit die Kompatibilität des Fliesendesigns mit hochauflösenden, präzisen Druckeinstellungen nachzuweisen, wurden in der vorliegenden Studie die hohe Auflösung und Präzision des eingesetzten 3D-Druckers genutzt. Ein durchschnittlicher Desktop-FDM-3D-Drucker, der etwa 350 Euro kostet (Shenzhen Creality 3D Technology Co, Ltd., Shenzhen, China, <https://www.creality.com/>), kann zum Drucken einer unbegrenzten Anzahl dieser Fliesen verwendet werden. Das zum Drucken einer Fliese verwendete PLA-Filament kostet 4 Euro. Während

Die Kosten für den Maschinenverschleiß können zu den Gesamtkosten der Fliesen hinzugerechnet werden, die den Stromverbrauch und die Auswirkungen des 3D-Druckauftrags auf den Maschinenverschleiß umfassen; diese Kosten werden vom Hersteller festgelegt. Sie können als Prozentsatz der Materialkosten geschätzt werden oder den Materialkosten entsprechen. In der vorliegenden Arbeit werden die Verschleißkosten aufgrund der durch die hohe Druckgeschwindigkeit verursachten Verschleißwirkung als gleich den Materialkosten definiert. Daher betragen die Gesamtproduktionskosten für eine bioreceptive Fliese 8 EUR. In einigen Fällen können die Kosten für den Designer zu den Gesamtkosten der Fliese hinzugerechnet werden; in dieser Arbeit werden jedoch nur die tatsächlichen Produktionskosten dargestellt, was im Einklang mit dem Zweck der dezentralen Produktion dieser bioreceptiven Fliese zur Integration von Biolumineszenz in die gebaute Umwelt steht.

Andererseits werden die Kosten für die Kultivierung des in der vorliegenden Studie verwendeten biolumineszenten Bakterienstamms *Allivibrio fischeri* ebenfalls nicht in die Produktionskosten der Fliesen einbezogen, da dieser aus befreundeten mikrobiologischen Labors an Universitäten und Forschungszentren bezogen werden kann und selbst im Falle eines Kaufs das Starter-Kit einschließlich der Medienkomponenten nur etwa 340 Euro kostet (Fisher Scientific S.L., 28108-Alcobendas, Madrid, Spanien / Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA), mit denen die Bakterienkultur unbegrenzt regeneriert werden kann. Solche bioreceptiven Fliesen müssen nicht in Bioreaktorbehältern untergebracht werden, da die biolumineszenten Bakterien, wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt, auf festen Medien wachsen und leuchten können. Darüber hinaus können diese bioreceptiven Fliesen als Verkleidung für jede Fassade verwendet und von einer Vielzahl membranartiger Materialien, wie beispielsweise Ionenaustauschmembranen [23], umschlossen werden, um ihre sichere Integration in die gebaute Umwelt zu gewährleisten. Es gibt eine Vielzahl von Ionenaustauschmembranen, deren Preise zwischen 1,5 EUR pro m^2 und 500 EUR liegen (Fuel Cell Store, © 2025, Bryan, TX, USA). Diese Produktionskosten der biolumineszenten Fliese sind im Vergleich zu den Produktions- und Betriebskosten eines Bioreaktors wirtschaftlich wettbewerbsfähig, da sich die Produktionskosten pro Bioreaktorfliese beim 3D-Druck eines hermetischen Bioreaktors mit demselben Feldmuster mit dem Faktor 6 erhöhen ($6 \times 4 \text{ EUR} = 24 \text{ EUR}$), da ein einfacher Quader- oder Kastenbioreaktor sechs Seiten hat. Dies führt zu einem Anstieg der Gesamtproduktionskosten, wenn man den Faktor des Maschinenverschleißes berücksichtigt, der auf das gleiche Niveau wie die Materialkosten geschätzt wird, was Gesamtkosten von 48 EUR ergibt. Hinzu kommen die Kosten für Komponenten des Hilfsystems, einschließlich Zirkulation und Abwasser, die aus Rohren, Ventilen und Filtern bestehen, sowie die Komplexität der Abwasserableitung und der Wiederbefüllung des Systems mit frischem Medium. All diese Faktoren machen die in der vorliegenden Studie entwickelten bioreceptiven Fliesen zu einem langlebigeren und leichter zu handhabenden System als Bioreaktoren.

Ein vollständig montierter städtischer Bildschirm im architektonischen Maßstab 1:1 ist in Abbildung 3 dargestellt, nebeneinander mit den Details der entwickelten Fliese, die ihre quadratische Mikrostruktur als Bausteingestell dieses biolumineszenten städtischen Bildschirmsystems aufweist.



Abbildung 3. Das städtische Schirmsystem ist für die Aufnahme des biolumineszenten Bakterienstamms *A. fischeri* konzipiert und lässt sich in die bebaute Umgebung sowie in architektonische und städtebauliche Anwendungen integrieren. **1.** Eine 3D-gedruckte, bioreceptive Kachel des biolumineszenten städtischen Schirms, die die abwechslungsreiche Topologie zwischen Erhebungen, Vertiefungen und Zwischenräumen sowie das mikrostrukturierte quadratische Raster für eine bessere Verankerung des aufgenommenen Bakterienstamms zeigt. **2.** Eine vollständig montierte städtische Bildschirmplatte mit den Maßen $170 \times 90 \times 4$ cm, die die 3D-gedruckten Kacheln mit verschiedenen PLA-Filamenten in den Ausführungen durchscheinend, transparent und fluoreszierend enthält, deren Wirkung auf die Biolumineszenzaktivität des in *A. fischeri* beherbergten Bakterienstamms getestet und in einer zukünftigen Studie vorgestellt werden soll.

Optimierte Nährmedien für die biolumineszente Bakterienart *Aliivibrio fischeri* CECT 524

Die Marine-Bouillon (MB) führte zu einer höheren Wachstumsrate von *Aliivibrio fischeri* CECT 524, wobei die 3D-Kultur mit Bio-Tinte zwar sichtbares biolumineszentes Licht ausstrahlte, jedoch Schwankungen in der Absorption aufwies; dabei wurde nach 18 Stunden ein negativer OD-Wert verzeichnet, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen war, dass der Nährstoffverbrauch der wachsenden Bakterien dazu führte, dass die Lösung klar wurde (Abbildung 4, Tabelle 1). Von den verschiedenen analysierten Agarkonzentrationen erzielte die Agarkonzentration von 40 % bis 50 % für die festen Medien, die auf die städtischen Siebplatten aufgetragen wurden, die besten Ergebnisse hinsichtlich der Ermöglichung des biolumineszenten Chemotaxis-Verhaltens, da *A. fischeri* bei niedrigeren Agarkonzentrationen eine erhöhte Mobilität aufwies, was eine bessere Nährstoffverfügbarkeit sicherstellte. Es wurden keine Unterschiede in der Biolumineszenz zwischen NaOH und KOH beobachtet, die als Mittel zur pH-Einstellung auf die Bioink-Medien auf den Urban-Screen-Panels aufgetragen wurden.

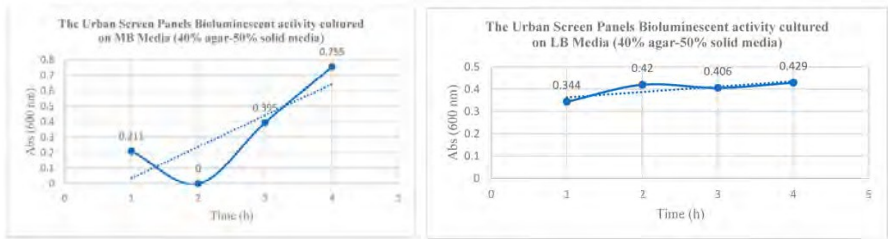


Abbildung 4. Die Biolumineszenzaktivität der Urban-Screen-Platten auf MB-Medium im Vergleich zu LB-Medium. **1.** Die Biolumineszenzaktivität der Urban-Screen-Panels bei Kultivierung auf MB-Medium (40 % Agar – 50 % Festmedium) zeigte den höchsten Abs-Wert als Indikator für die Bakteriendichte und -aktivität von *A. fischeri* bei Kultivierung auf Marine Broth, der 0,755 Abs erreichte, trotz der Schwankungen in der zweiten Stunde, die auf die Lag-Phase zurückzuführen sind. **2.** Die Biolumineszenzaktivität der Urban-Screen-Panels bei Kultivierung auf LB-Medium (40 % Agar – 50 % Festmedium) zeigt den höchsten erreichten Abs-Wert von 0,429, der niedriger ist als im Fall des Marine-Broth-Kulturmediums. Die Einheit Abs steht für Absorption, eine Größe, die misst, wie viel Licht eine Substanz bei einer bestimmten Wellenlänge absorbiert. Es handelt sich um eine logarithmische Messgröße, oft als optische Dichte bezeichnet (Molecular Devices, 2024: <https://www.moleculardevices.com/technology/absorbance>, abgerufen am 5. September 2025), wobei höhere Abs-Werte auf eine stärkere Lichtabsorption durch die Probe und eine geringere Lichtdurchlässigkeit hinweisen. Die durchgezogenen Linien stellen die geschätzten Absorptionswerte (Abs) über die Zeit (h) dar, während die gepunkteten Linien die abgeleitete Funktion darstellen, die das Gesamtverhalten der biolumineszenten Bakterienkultur auf den Platten wiedergibt; diese ist im ersten Fall „Die Biolumineszenzaktivität der Urban-Screen-Platten bei Kultivierung auf MB-Medium (40 % Agar – 50 % Festmedium)“ eine Wachstumsfunktion und im zweiten Fall „Biolumineszenzaktivität der Urban-Screen-Platten bei Kultivierung auf LB-Medium (40 % Agar – 50 % Festmedium)“.

The Urban Screen Panels Bioluminescent Activity Cultured on MB vs. LB		
	MB	LB
Time (h)	Abs (Absorbance) 600 nm	Abs (Absorbance) 600 nm
13 h (08:00 am)	0.211	0.344
18 h (13:00 pm)	Negative	0.420
21 h (16:00 pm)	0.395	0.406
23 h (18:00 pm)	0.755	0.429

Tabelle 1. Die Biolumineszenzaktivität der städtischen Screen-Panels bei Kultivierung auf MB im Vergleich zu LB, gemessen anhand der Absorption bei 600 nm nach 5, 3 bzw. 2 Stunden.

Das LB-Bouillonmedium belegte hinsichtlich des erzielten Zellwachstums und der Biolumineszenzaktivität den zweiten Platz, wobei die optimale Meersalzkonzentration bei 15 g/l Natriumchlorid AGR erreicht wurde. Das TSB-Medium lieferte negative Ergebnisse.

Dreidimensional gedruckte Urban-Screen-Platten mit Biolumineszenzaktivität

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Biolumineszenzaktivität von *Aliivibrio fischeri* CECT 524 wurden bei blaugrünem Licht mit einer Wellenlänge von ~490 nm erzielt, das mit bloßem Auge auf dem P1-Teil des städtischen Bildschirmpanels (Fliesen) besser sichtbar war (Abbildung 5), mit einer höheren Lichtemission, die ausreichte, um die Fliesenoberfläche bereits nach 3–10 s zu beleuchten, wenn diese in einem dunklen Raum platziert wurde und mit einer Belichtungszeit von 10 s mit einer Standard-Digitalkamera aufgenommen wurde. Eine längere Dauer der Lumineszenzaktivität, die bis zu 10 Tage ohne Nachfüllen des Wachstumsmediums anhielt, wurde durch den MB-Medien-Slurry-Spray nachgewiesen, im Vergleich zu den anderen drei Teilen (P2, P3 und P4), bei denen die sichtbare Biolumineszenzaktivität zwischen 3 und 7 Tagen anhielt. Es wurde beobachtet, dass die maximale Lichtemission an den dünnen, gekrümmten Spitzen der 3D-gedruckten Feldmuster sichtbar war, da diese hinsichtlich ihrer Biolumineszenzaktivität im Vergleich zu den 3D-Oberflächen der Vertiefungen und den projizierten Streifen beständiger waren, wie in Abbildung 5 dargestellt, die die Dichte der projizierten Spitzen zeigt, die >0,5 cm hoch waren, die projizierten Streifen von ≤0,3 cm und die Vertiefungen an jedem der vier Teile des 3D-gedruckten biorezeptiven Panels mit seinem feldbasierten Muster.

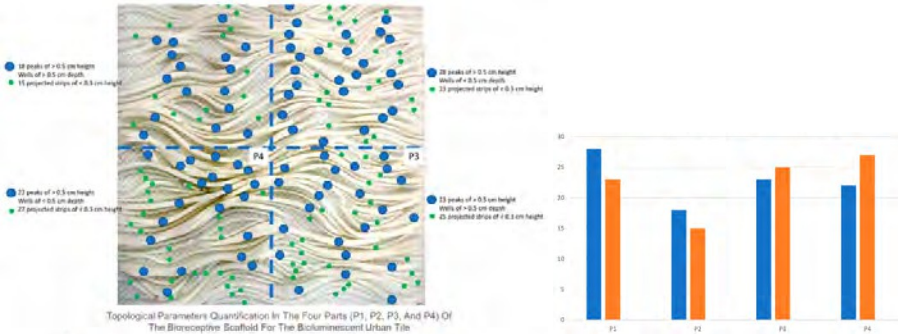


Abbildung 5. Die feldbasierte Musterdichte und die Verteilung der topologischen Ebenen in jedem der vier Teile der ursprünglichen, biorezeptiven, 3D-gedruckten Platte, die als Gerüst für die biolumineszente Bio-Tinte dient. In jedem der vier Teile werden die Anzahl der Spitzen > 0,5 cm, die projizierten Streifen von ≤ 0,3 cm und die unterschiedlich großen Vertiefungen dargestellt, um die besten Ergebnisse der Biolumineszenzaktivität zu begründen, die auf P1 erzielt wurden. Die blauen Punkte stehen für die Anzahl der Spitzen, die grünen Punkte für die Anzahl der projizierten Streifen, während den Vertiefungen keine bestimmte Farbe zugewiesen wurde, da alle Zwischenräume zwischen den Spitzen oder Streifen als Vertiefungen betrachtet wurden. P1 zeichnete sich hinsichtlich der Anzahl der Peaks mit 28 Peaks aus, die höher als 0,5 cm waren, dank ihrer kurzen Ausdehnung im Vergleich zu den durchgehenden Peaks von P2. P1 wies zudem engere Vertiefungen mit Breiten von weniger als 0,5 cm auf, was die Zelladhäsion und die Verankerung der Kultur verbesserte. Schließlich führte die moderate Anzahl an hervorstehenden Streifen bei P1 in Kombination mit den engen Vertiefungen und den hohen Erhebungen im Vergleich zu P2, P3 und P4 zur besten Dauerhaftigkeit und Intensität der Biolumineszenz. Von den Autoren.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, war die Anzahl der Erhebungen der entscheidende Parameter für die optimale Bioaffinität der biolumineszenten bakteriellen Bio-Tinte, die die höchste Intensität und Haltbarkeit des emittierten blaugrünen Lichts erzielte; im Fall von P1 hielt dieses Licht 10 Tage lang an, ohne dass ein Nachfüllen erforderlich war, da die Schicht der biolumineszenten bakteriellen Bio-Tinte an diesen Erhebungen im Vergleich zu den Vertiefungen und den Streifen dünner war. Dies ermöglichte eine bessere Sauerstoffversorgung und den kürzesten Weg für die Bakterienzellen, durch die 3D-Kultur der Bio-Tinte zu gleiten und ihr kooperatives Biolumineszenzverhalten zu zeigen. Darüber hinaus erhöhte in P1, mit der höchsten Anzahl von 28 Spitzen, die Verteilung der hohen Spitzen mit ihren kurzen Abständen die Sauerstoffzirkulation, zusammen mit dem Effekt der Spitzen in der Topologie, verstärkt durch das Zusammenspiel mit den engeren Vertiefungen und der moderaten Anzahl der projizierten Streifen, d. h. 23 Streifen, die weniger als 0,3 cm hoch sind. P4 belegte dank seiner 22 Spitzen und engen Vertiefungen den zweiten Platz in Bezug auf die Biolumineszenz-Effizienz. P3 kam an dritter Stelle, mit 23 Spitzen, die höher als 0,5 cm waren. Die breiteren Vertiefungen von mehr als 0,5 cm Breite behinderten das biolumineszente Chemotaxis-Verhalten und beeinträchtigten die Verankerung der 3D-Kultur am Gerüst, trotz der großen Anzahl der projizierten Streifen. P2 belegte den letzten Platz mit einer geringeren Anzahl an Spitzen und breiteren Vertiefungen, die die Verankerung der 3D-Zellkultur innerhalb der biolumineszenten Bio-Tinte behinderten, was den Einfluss der Geometrie des Gerüsts auf die Biolumineszenz-Effizienz der Bio-Tinte belegt.

Abbildung 6 zeigt die Kultivierungsverfahren für das Einfrieren der 3D-gedruckten Kacheln auf einer Kühlplatte vor der Beimpfung zur Sterilisierung sowie zur Aufrechterhaltung der in Schritt 2 hinzugefügten Suspensionskultur. Die Schritte 3 und 4 zeigen P1 nach der Beimpfung, und das blaugrüne Licht wurde 10 Tage lang emittiert, ohne dass das Medium nachgefüllt werden musste, was die Nachhaltigkeit dieses Ansatzes belegt, der auf der Kombination des maßgeschneiderten geometrischen Designs des Gerüsts mit der maßgeschneiderten biolumineszenten Bio-Tinte basiert. Er bietet zudem geringere Wartungskosten und weniger aufwendige Verfahren als Bioreaktoren und verfügt über sich selbst erhaltende Strukturen, was Anwendungen im architektonischen und städtischen Maßstab ermöglicht. Von den Autoren.





Abbildung 6. Kultivierung des biolumineszenten städtischen Bildschirms und Biolumineszenzaktivität:

1. Einfrieren der in vier Teile geteilten, 3D-gedruckten Platte auf einer Kühlplatte zur Sterilisierung und Vorbereitung für das Aufbringen der Suspensionskultur der biolumineszenten Bio-Tinte. Nach dem Beimpfen wurde die Platte mit dem Nährmedium in fünf Schichten bedeckt. 2. Die beimpften Teile der Stadtbild-Platten, kultiviert in Petrischalen. 3. Der P1-Teil der städtischen Bildschirmplatte, besiedelt mit der biolumineszenten Bakterienkultur + Medium in Agar. 4. Derselbe Teil unter einer herkömmlichen Digitalkamera (wie es das bloße menschliche Auge sieht), wobei die sichtbare Biolumineszenzaktivität zu erkennen ist, die 10 Tage lang ohne Nachfüllen anhält. Von den Autoren.



Abbildung 7. Designvarianten für die bioreceptiven Paneele, bei denen das Design durch die Anpassung feldbasierter Muster mit unterschiedlichen Wachstumsmustern variiert wird; zudem werden Farbe, Transparenz und Reflektivität des verwendeten PLA-Filaments im 3D-Druckprozess jeder dieser Designvarianten variiert. Von den Autoren.

Ergebnisse von Schritt 3

Abbildung 8 zeigt einen Prototyp einer Biolampe mit 5 Biocups und insgesamt 20 Petrischalen, deren emittierte Biolumineszenz innerhalb von 3–5 Sekunden unmittelbar auf einen dunklen Raum reagiert.

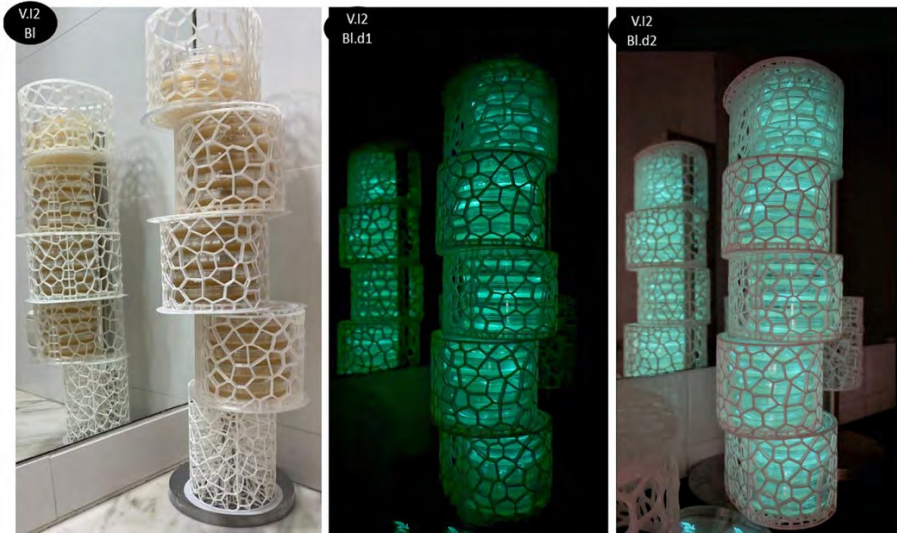


Abbildung 8. Ein Prototyp einer Biolampe, bestehend aus vier Biocups und einem zylindrischen, hohlen Voronoi-Sockel, der als Gerüst dient, an dem sich die gentechnisch veränderten biolumineszenten Pflanzen emporranken können – eine Kreuzung zwischen der natürlichen Biolumineszenz des Bakterienstamms *A. fischeri* und der gentechnisch veränderten biolumineszenten Pflanze. Die Basis wurde durch eine fünfte Bio-Schale ersetzt, um mehr Licht zu erzeugen. **V.12-BI** ist die vollständig montierte Biolampe mit 4 Bio-Schalen, die jeweils 5 Petrischalen mit festen Kulturen der biolumineszenten Bakterien *A. fischeri* enthalten. **V.12** steht für Voronoi-Iteration 2 und **BI** für Biolampe. Die **V.12-BI d1** und **d2** sind zwei Detailaufnahmen, die die Biolumineszenzintensität der Biolampe zeigen, die durch den vorliegenden biolumineszenten Bakterienstamm erreicht wird. (Fotos aufgenommen mit einer herkömmlichen Digitalkamera, f/1,6: mittleres Foto mit einer Belichtungszeit von 3 Sek., wie es das bloße menschliche Auge sieht, und rechtes Foto mit 10 Sek. Belichtungszeit). Unten verschiedene 3D-gedruckte Varianten der Biocups, um die beste zu finden. Von den Autoren.

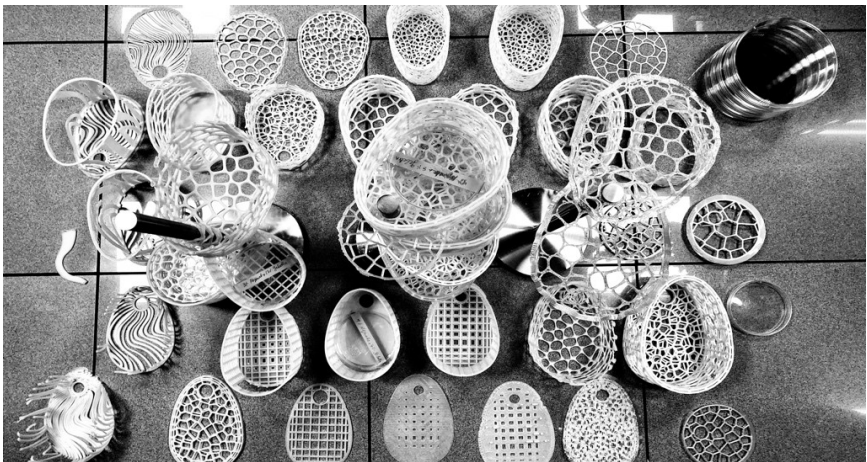


Abbildung 9 zeigt die vier wichtigsten Designiterationen der Voronoi-Designfamilie, während Abbildung 10 dieselben Iterationen als 3D-gedruckte Modelle darstellt.

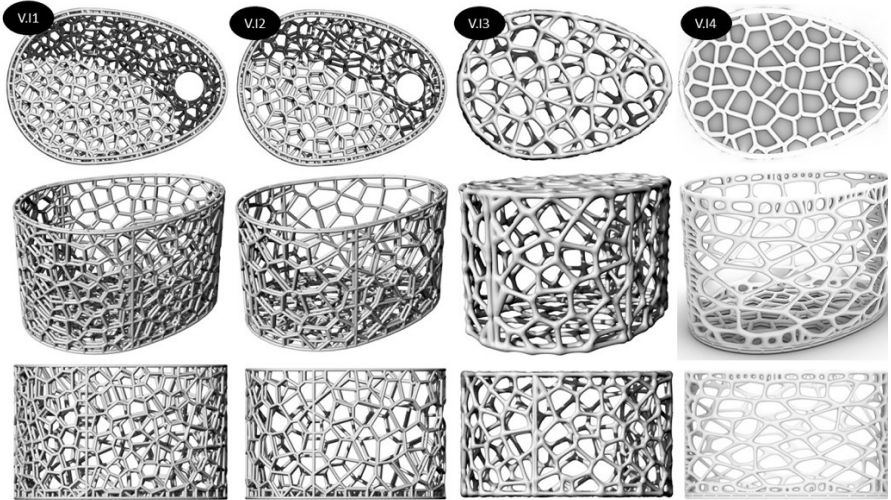


Abbildung 9. Vier verschiedene Iterationen der Voronoi-Designfamilie der Biocups. **V.I.1** zeigt die erste Designiteration mit einer dichten, geraden, doppelwandigen Voronoi-Struktur mit 500 Punkten als Basis für die 3D-Voronoi-Struktur (mit Draufsicht, perspektivischer Ansicht und linker Seitenansicht), erweitert zu **V.I.2** mit geringerer Dichte und einer breiteren, doppelwandigen Voronoi-Struktur mit 300 Punkten als Basis der Voronoi-Struktur. **V.I.3** zeigt den Übergang zu einer geschwungenen (abgeschrägten) einwandigen Hohlrohr-Voronoi-Struktur mit 150 gleichmäßig verteilten Punkten der Voronoi-Struktur, während bei **V.I.4** Attraktoren der Voronoi-Struktur an den Rändern des Biocups hinzugefügt werden, um die horizontalen Enden jedes Biocups hervorzuheben. Diese Iteration würde jedoch zu einer ungleichmäßigen Ausbreitung des emittierten biolumineszenten Lichts führen, das Licht am Boden und an der Oberseite jedes Biocups blockieren und zu einer geringeren Lichtmenge führen. Daher wurde die Iteration **V.I.3** für die weitere Anpassung und Anwendung in den Biolampen ausgewählt.



Abbildung 10. Die 3D-gedruckten Iterationen der Voronoi-Familie von Biocup-Entwürfen, erstellt von den Autoren.

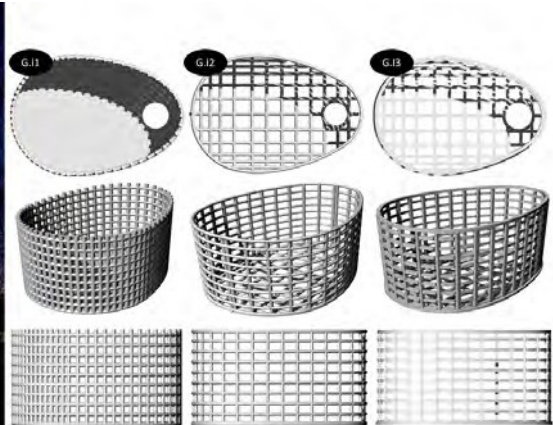


Abbildung 11. Designkonzept, inspiriert vom Bochumer Gebäude der Fritz-und-Trude-Fortmann-Stiftung: links, imaginäre urbane Biolampen mit dem Bochumer Gebäude im Hintergrund. Auf der rechten Seite sind die Iterationen der Gitter-Designfamilie zu sehen, darunter **G.11** mit einem dichten vertikalen Gitter und geschlossenem Boden, **G.12** mit breiteren Öffnungen und kreisförmigem Profil der Gitterstreben sowie einem Gitterboden, während **G.13** moderate Öffnungen und ein quadratisches Profil der Gitterstreben sowie einen Gitterboden aufweist, was die optimierte Designiteration in dieser Designfamilie darstellte. Von den Autoren.

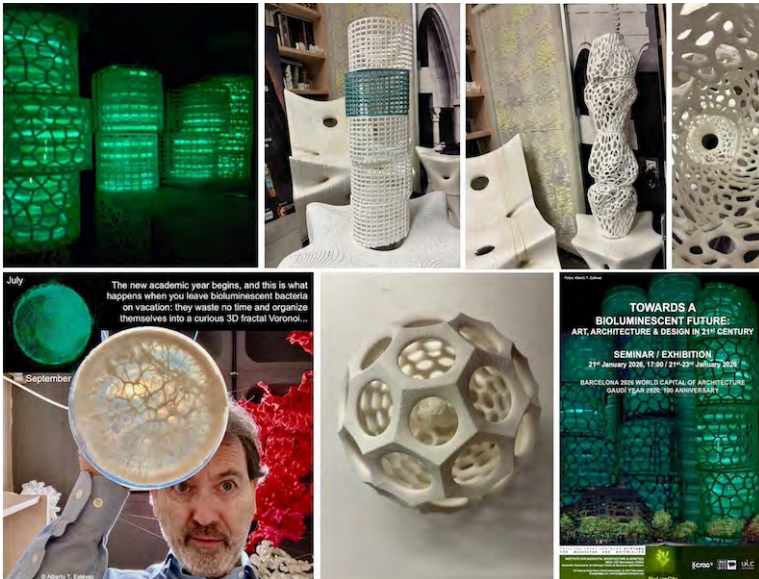


Abbildung 12. Von links nach rechts: die endgültige Familie der Voronoi-Biolampen, die Gitter-Biolampe, die Biokolonne und darunter Bakterien, die sich nach zwei Monaten Wachstum selbst zu einem Voronoi-Muster organisiert haben, die Radiolarien-Biolampe und das Ausstellungsplakat: alles digital entworfen und im 3D-Druck für den biolumineszenten Einsatz im häuslichen und städtischen Bereich. Von den Autoren.

Wie in Abbildung 12 unten links zu sehen ist, organisieren sich die Bakterien nach zwei Monaten Wachstum selbst zu einem Voronoi-Muster: das digitalisierte Voronoi-Muster dient als Struktur für die Biolampen. Daneben befindet sich die Radiolarien-Biolampe und darüber rechts die Biolampensäule.

Ergebnisse von Schritt 4

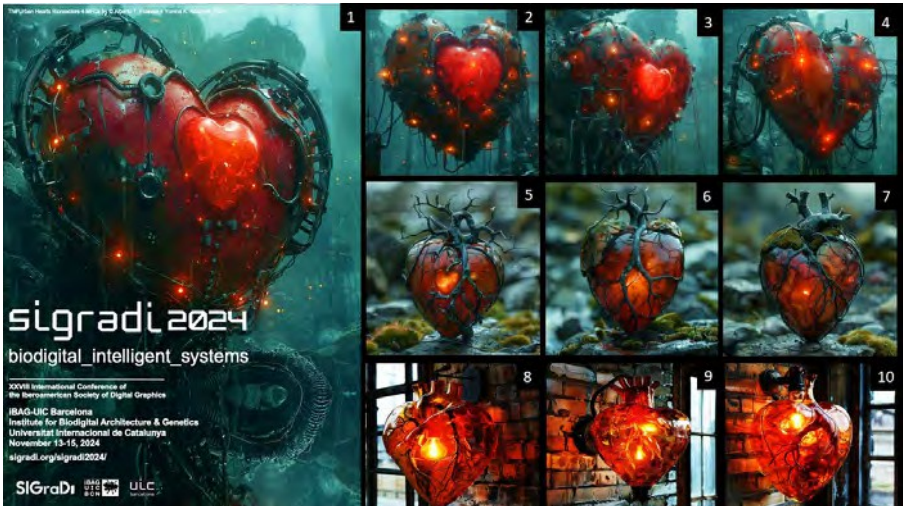


Abbildung 13. Die Visualisierung der „Urban Hearts“-Bioreaktoren, präsentiert auf der SiGraDi-2024-Ausstellung an der Universität Internacional de Catalunya in Barcelona im November 2024. 1. Das Hauptplakat der SiGraDi-2024-Konferenz zum Thema „Biodigitale intelligente Systeme“ zeigt eine abstrakte Herzform mit einem biolumineszenten roten Herzkern in leuchtendem Rot, während die gesamte Form des Herzbioreaktors im städtischen Maßstab visualisiert ist, mit elektrischen Anschlüssen, um die Nutzung des erzeugten elektrischen Stroms aus dieser 4-Kammer-Mikrobialbrennstoffzelle (MFC) darzustellen (Eine mikrobielle Brennstoffzelle ist eine Flüssigbatterie, die Bioagente wie Mikroorganismen – beispielsweise Bakterien, Algen und Pilze – nutzt, um durch die Oxidations-Reduktions-Reaktion, die auftritt, wenn die Mikroorganismen die Substrate im Wachstumsmedium innerhalb der mikrobiellen Brennstoffzelle verbrauchen, Strom zu erzeugen. Typischerweise besteht eine mikrobielle Brennstoffzelle aus zwei Kammern: der Anode und der Kathode, die üblicherweise durch eine Brücke verbunden sind, um den Elektronenfluss von der Anode zur Kathode zu erleichtern, was zu elektrischem Strom führt. Es gibt verschiedene Konfigurationen von mikrobiellen Brennstoffzellen, darunter Doppelkammer-, Einzelkammer- und Mehrkathoden-Brennstoffzellen sowie andere, die auf städtischer Ebene neu verteilt werden. 2., 3. und 4. sind verschiedene Darstellungen desselben Konzepts der „Urban Hearts“-Bioreaktoren mit Variationen des zentralen biolumineszenten Herzkerns und der elektrischen Anschlüsse. 5., 6. und 7. sind Darstellungen der „Urban Hearts“-Bioreaktoren im Maßstab eines architektonischen Elements, wobei die biolumineszenten Bakterien- und/oder Algenkulturen als „Bio-Container“ verstanden werden und eine anatomisch detailliertere Darstellung des Herzens zeigen. 8., 9. und 10. sind Darstellungen im Maßstab eines Innenarchitektur-Elements, das als passive Beleuchtungseinheit eingesetzt wird, die die erzeugte Biolumineszenz und/oder Bioelektrizität im häuslichen Gebrauch nutzt, wobei diese Herzen verwendet werden können als

Biobehälter für biolumineszente Kulturen, eine mikrobielle Brennstoffzelle mit zwei oder vier Kammern zum Betreiben einer Glühbirne oder sogar ein dekorativer Glasbehälter, der als künstlerisches Beleuchtungselement genutzt werden kann. Die Renderings wurden mithilfe von AI-Diffusion-Modellen erstellt, die mit textuellen und visuellen Vorgaben gefüttert wurden; die Ergebnisse wurden von den Autoren mit Adobe Photoshop bearbeitet.

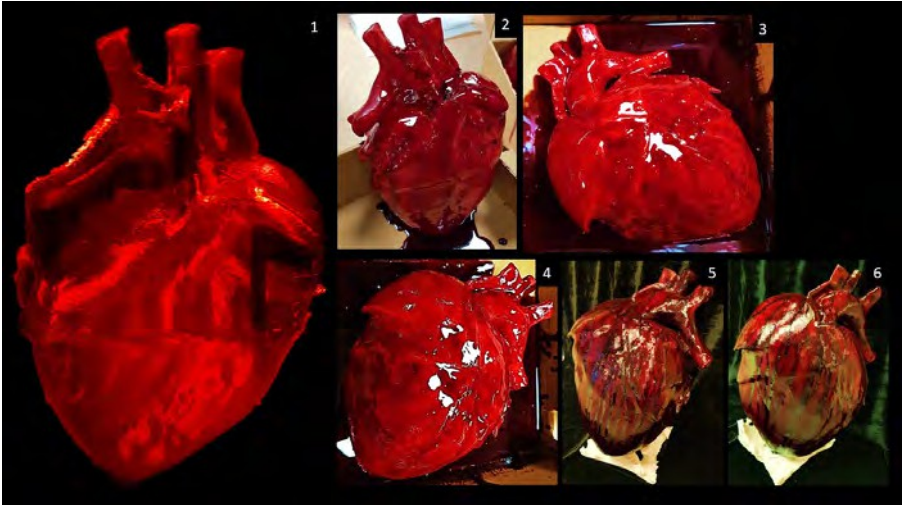


Abbildung 14. 3D-Druck und Farbgebung der „Urban Hearts“-Biobehälter und MFC-Kammern: verschiedene Maßstäbe der 3D-gedruckten Herz-Biobehälter. 1. Der 3D-gedruckte Herz-Biobehälter im städtischen Maßstab (40 x 40 x 50 cm) wurde mit dem Felix XL Pro Dual-Head-Drucker aus durchscheinendem rotem PLA gedruckt. 2., 3. und 4. zeigen den Herz-Biobehälter im Maßstab eines architektonischen Elements (20 x 20 x 20 cm), 3D-gedruckt aus durchscheinendem rotem PLA mit dem Felix Pro Dual-Head-Drucker und mit Lack (durchscheinendes Carmenrot und durchscheinend) versehen, um eventuelle Gussnähte zu verbergen und den realistischen Effekt von Herzkapillaren und Blut zu erzielen, der das menschliche Herz nachahmt. 5. und 6. sind zwei Ansichten des getrockneten „Urban Heart“-Bio-Containers auf einem 3D-gedruckten Ständer, der Teil des „Heart Shelter Brick“ ist. Unten: die „Urban Hearts“- und „Bone“-Bio-Container in der BioLumCity-Ausstellung. Von den Autoren.





Abbildung 15. Das „Heart-Shelter“-Ziegelsystem. 1., 2., 3. und 4. zeigen verschiedene Ansichten des 3D-gedruckten „Heart-Shelter“-Ziegels, der seine knochenähnliche poröse Struktur aufweist, die durch algorithmische Modifikation des strukturellen Musters von trabekulärem Rinderknochen aus CT-Scans entwickelt wurde, und die feste Anordnung des Herz-Biobehälters innerhalb der maßgeschneiderten Höhle im Ziegel-Shelter zeigt, wo der Herz-Biobehälter leicht zu handhaben ist, um mit frischem biolumineszente Medium aufgefüllt zu werden, jedoch nicht aus dem Shelter entfernt werden kann, um dessen Verlust zu verhindern. 5. und 6. zeigen die MFC-Anordnung der Herz-Bioreaktoren innerhalb ihres Schutzes und veranschaulichen die leuchtende Biolumineszenz der Herzen in einem dunklen Raum bei einer Reaktionsaktivierungszeit von 3 Sekunden. Von den Autoren.



Abbildung 16. Der knochenförmige Biobehälter für biolumineszente Flüssigkulturen. 1. und 2. zeigen zwei Ansichten des Modells des knochenförmigen Biobehälters im Maßstab 1:10. 3. zeigt die 3D-gedruckten Modelle der Biobehälter im Maßstab 1:2 in verschiedenen Druckphasen und mit unterschiedlichen PLA-Filamenten, darunter durchscheinende, transparente und leuchtende Filamente. Das Foto stammt von der Ausstellung „Heart of Architecture“, die im Februar 2025 an der Universität Internacional de Catalunya in Barcelona stattfand. Von den Autoren.

Berichterstattung über die Ergebnisse (Verbreitung und wissenschaftliche Kommunikation): Publikationen und Ausstellungen

Während der zweijährigen Laufzeit des geförderten Forschungsprojekts wurden Veranstaltungen und Publikationen als Mittel zur wissenschaftlichen Kommunikation dieses Forschungsprojekts durchgeführt. Ziel war es, das Interesse und das Bewusstsein für Biolumineszenz und Bioenergie als erneuerbare, saubere und kostengünstige Energiequellen zu fördern. Diese Verbreitungsaktivitäten umfassten Folgendes:

1. Die offizielle Ausstellung der internationalen Konferenz der Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, SIGraDi 2024 „Biodigital Intelligent Systems“, die im November 2024 an der Universität Internacional de Catalunya in Barcelona stattfand:
<http://www.sigradi.org/sigradi2024> <https://www.uic.es/es/agenda/sigradi-2024-biodigital-intelligent-systems>

Die Ausstellung umfasste die Prototypen der ersten Phase der Biolampen und der „Urban Hearts“-Biobehälter sowie die ersten Prototypen der bioreceptiven Paneele und einen Bildschirm aus bioreceptiven Paneelen für den Einsatz im städtischen Maßstab. Hinzu kam das offizielle Poster der SIGraDi 2024-Konferenz „Biodigital Intelligent Systems“, wie in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17. Die Präsentation des BioLumCity-Projekts auf der SIGraDi 2024-Konferenz. 1. Das offizielle Poster der Konferenz SIGraDi 2024 Biodigital Intelligent Systems und 2. aus der Ausstellung, in der die ersten Prototypen der Biolampen aus Petrischalen und die herzförmigen Biocontainer für flüssige biolumineszente Kulturen gezeigt wurden.

2. Die Ausstellung „The Heart of Architecture“, die im Februar 2025 an der Universität Internacional de Catalunya in Barcelona, Spanien, stattfand: <https://www.uic.es/en/noticia/heart-architecture-heart-combines-biotechnology-sustainability-and-art-uic-barcelona>.

Die Ausstellung konzentriert sich auf das Konzept des Herzens als Bioreaktor, der in der Lage ist, Leben durch unseren Körper zu pumpen. Inspiriert von seiner Morphologie und seinen Funktionen dient der herzförmige Biobehälter der Inkubation und Kultivierung von Stämmen der flüssigen Kultur biolumineszenter Bakterien und Algen. „The Heart of Architecture“ stellt eine Metapher dar. So wie das menschliche Herz sauberes, sauerstoffreiches Blut pumpt, reinigt dieses bioinspirierte System verschmutzte Luft und verteilt sie durch die Adern der Stadt, wodurch eine gesündere, nachhaltigere Umwelt geschaffen wird. Die Ausstellung umfasste die herzförmigen Biobehälter und die knochenförmigen Biobehälter.

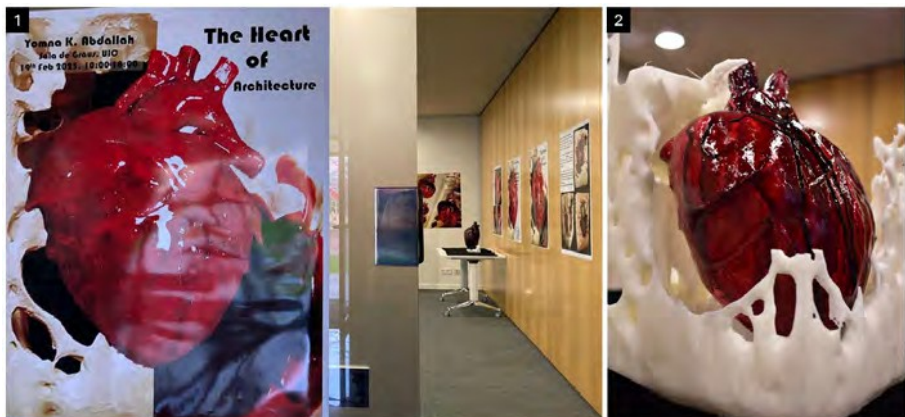


Abbildung 18. Die Ausstellung „The Heart of Architecture“ an der UIC Barcelona im Februar 2025, in der die herzförmigen Biobehälter und die von Knochen inspirierten Biobehälter für flüssige biolumineszente Bakterien- und Algenkulturen gezeigt wurden. Von den Autoren.

3. Veröffentlichung des Forschungsartikels: „BioLumCity: 3D-gedruckte biolumineszente Stadfliesen unter Verwendung von *Aliivibrio fischeri*-Bio-Tinte als passives Stadt-Licht-“, in *Appl. Microbiol.* 2025, 5(4), 105: <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5040105>. *Applied Microbiology* ist eine internationale, peer-reviewte Open-Access-Zeitschrift zur Anwendung von Mikroorganismen, die monatlich online von MDPI veröffentlicht wird. Journal-Ranking: CiteScore – Q2 (Biochemie, Genetik und Molekularbiologie (Sonstiges)).

Der Artikel stellte die Ergebnisse vor, die durch die Anwendung einer modifizierten biolumineszenten Bakterienkultur als Sol-Gel-Medium auf den entwickelten 3D

gedruckten bioreceptiven Fliesen, die als Gerüst zur Unterstützung der biolumineszenten Kultur dienen, was deren Anwendung im architektonischen und städtischen Maßstab ermöglichte und eine einfache Wartung garantierte, wie oben im Abschnitt „Ergebnisse“ (Ergebnisse von Schritt 1 & 2) erläutert.

Die Zusammenfassung des Forschungsartikels und die Schlüsselwörter lauten wie folgt:

Die Integration biolumineszenter Organismen als passive Lichtquellen in die gebaute Umwelt ist derzeit ein viel diskutiertes Thema. Allerdings gibt es mehrere Einschränkungen bei der Umsetzung und Skalierung dieser natürlich biolumineszenten Organismen in der gebauten Umwelt auf architektonischer und städtebaulicher Ebene, wie beispielsweise die Größe, Empfindlichkeit, die Einhausung und die Schwierigkeit der Wartung. Darüber hinaus gibt es komplexe technische und betriebliche Aspekte bei herkömmlichen Bioreaktoren, die diese biolumineszenten Organismen beherbergen, insbesondere hinsichtlich der Steuerung ihrer Nachfüllung und des Abwassers, ganz zu schweigen von ihren hohen Wartungskosten. Die vorliegende Arbeit stellt ein nachhaltiges, eigenständiges, biolumineszierendes städtisches Abschirmsystem vor, das *Aliivibrio fischeri* CECT 524-Bio-Tinte auf 3D-gedruckten, maßgeschneiderten Gerüsten als bioreceptives Paneeldesign auf der Grundlage eines Felddiffusionsmusters zur Aufnahme der biolumineszierenden bakteriellen Bio-Tinte nutzt. Das Felddiffusionsmuster wurde aufgrund seiner nachgewiesenen Effizienz bei der Einlagerung verschiedener mikrobieller Kulturen eingesetzt. Es wurden drei verschiedene Wachstumsmedien für die Kultivierung von *Aliivibrio fischeri* CECT 524 getestet, darunter Luria-Bertani-Bouillon (LB), Trypton-Soja-Bouillon (TSB) und die Standard-Meeressbouillon (MB). Die Ergebnisse zeigten, dass das Marine-Broth-Medium (MB) die höchste Biolumineszenzintensität und -dauer erzielte. Die maximale Lichtemission, typischerweise im Bereich von ~490 nm blaugrünem Licht, erfasst mit einer herkömmlichen Spiegelreflexkamera (menschliches Sehvermögen), wurde 10 aufeinanderfolgende Tage lang in völliger Dunkelheit nach 3–10 s bei einer Raumtemperatur von 25 °C beobachtet. Dies war vor allem an den dünnen, gekrümmten Spitzen des 3D-gedruckten Feldmusters sichtbar. P1 erzielte die höchste Leistung in Bezug auf sichtbares blaugrünes Licht, und dank der hohen Anzahl an Spitzen und schmalen Vertiefungen bei

<0,5 cm seines Felddiffusionsmusters. Diese Studie belegt die Effizienz dieses biomimetischen Musters hinsichtlich der Bioreceptivität der biolumineszenten bakteriellen Bio-Tinte. Darüber hinaus bewiesen die vorgeschlagenen 3D-gedruckten städtischen Bildschirme ihre wirtschaftliche Nachhaltigkeit hinsichtlich ihrer Erschwinglichkeit und ihrer minimierten Produktionsprozesse sowie ihrer einfachen Wartung und Wiederaufladung. Diese Ergebnisse qualifizieren diese 3D-gedruckten biolumineszenten städtischen Bildschirme für eine einfache und dezentrale Einführung und Anwendung auf architektonischer und städtischer Ebene.

Schlüsselwörter: *Aliivibrio fischeri*; Biolumineszenz; bioreceptiv; bioaktive Fassaden; grüne Gebäude; städtische Sichtschutzwände; 3D-gedruckte Gerüste; biolumineszente Bio-Tinte; Felder; dezentrale Produktion; Biotechnologie in der Architektur; Biosysteme.

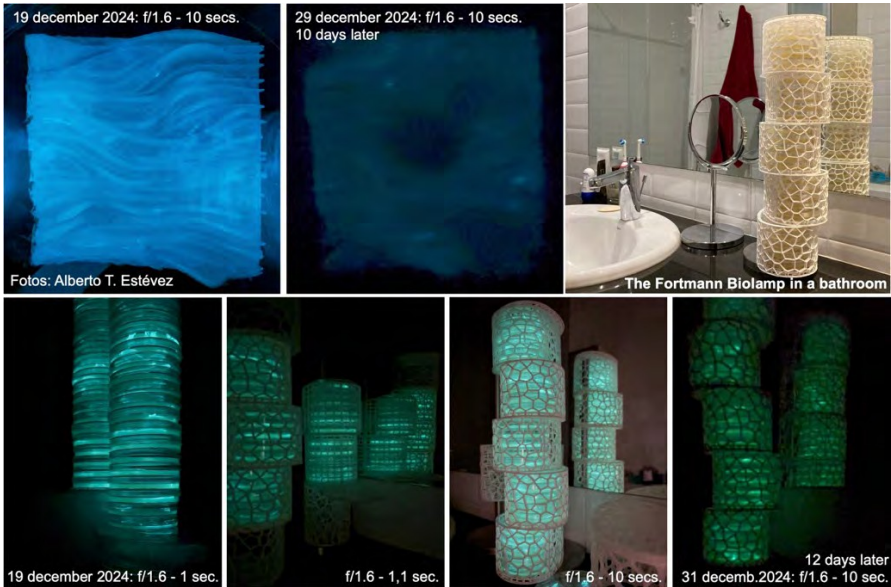
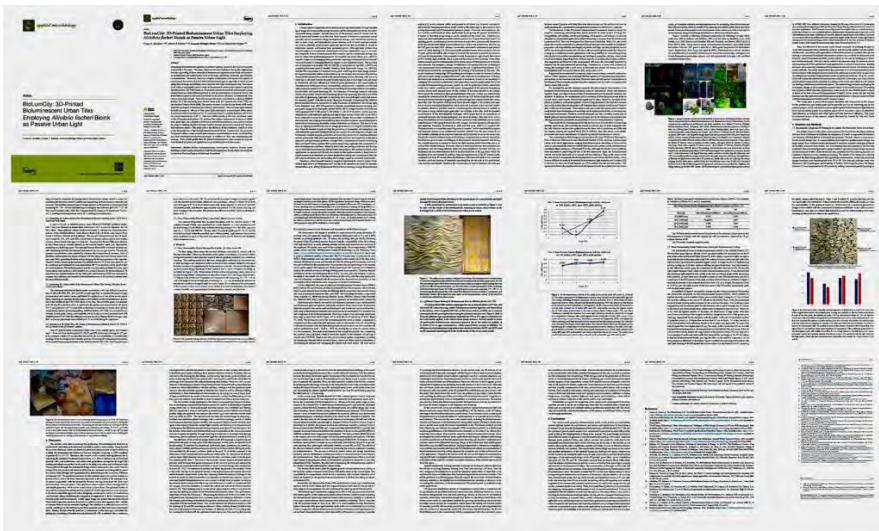


Abbildung 20. Oben, links und in der Mitte: Biolumineszenz auf der Platte. Rechts und unten: Biolumineszenz und die Fortmann-Bochum-BioLamp. Vergleich der Leuchtdauer über mehrere Tage: Fotos aufgenommen mit einer Apple iPhone 16e-Digitalkamera in völliger Dunkelheit, um die natürliche Wahrnehmung des menschlichen Auges nachzubilden. Von den Autoren.

Unten: Seiten des Artikels Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T.; Balfagón Martin, A.; Serra Soriano, M., (2025), „BioLumCity: 3D-gedruckte biolumineszente Stadtfliesen unter Verwendung von *Allivibrio fischeri*-Bio-Tinte als passive Stadtbeleuchtung“, *Appl. Microbiol.*, 5(4), 105, ISSN: 2673-8007. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5040105>.



BioLumCity Project

Bioluminescent Urban Screens 2023-2024

Alberto T. Estevez+ Yomna K. Abdallah

Funded by Fritz und Trude Fortman Stiftung

The Bioluminescent Urban Screens are an advanced design concept developed under the Biolumicity initiative, a funded project aimed at pioneering sustainable urban lighting through the integration of functional bioluminescent microbial strains. This approach harnesses biologically moderated, renewable light sources, establishing a new paradigm in eco-friendly urban illumination. At the current stage, the Bioluminescent Urban Screens utilize a passive immobilization system for the bioluminescent bacterial strain *Allivibrio fischeri*. The design leverages a custom geometric structure based on Field Theory to enhance the chemotactic behavior of *A. fischeri*, optimizing conditions for maximal bioluminescent emission. These urban screens are engineered to support both liquid and solid media for bioluminescent bacterial and algal cultures, allowing flexible implementation of microbial light sources. Through precisely tailored microenvironments within the tiles' niches, the bioluminescent cultures are sustained and controlled, creating an innovative and self-sustaining light solution for urban applications.

Bioluminescent urban lighting has long captivated the interest of Professor Alberto T. Estevez, leading him and his team at the Institute for Biодigital Architecture & Genetic (IBAG) and the Genetic Architecture Office and Research Group to explore innovative ways of enhancing naturally occurring bioluminescence by applying advanced genetic modification techniques; the group aims to amplify the brightness, duration, and color spectrum of luminescent emissions in select microbial strains. This research is directed towards integrating these enhanced bioluminescent organisms into urban infrastructures, creating a sustainable alternative to conventional lighting. The Genetic Barcelona Project exemplifies this vision, advancing through three progressive phases. The first phase involves the use of bioluminescent bacterial organisms as a form of natural, eco-friendly domestic lighting. The project's scope extends to its second phase, which aims to genetically modify the leaves of citrus limon (lemon trees) to emit a steady fluorescent glow, potentially transforming these trees into functional urban lighting fixtures. Through this work, Estevez's team is redefining urban illumination, demonstrating how genetic architecture can reshape our built environment by seamlessly integrating biological and technological innovation.

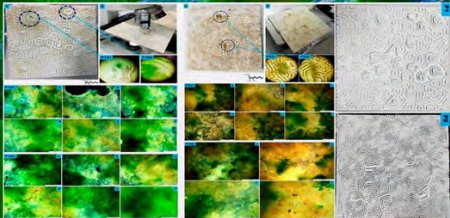
Previous Research and Background



Left: Alberto T. Estevez, Genetic Barcelona Project, Valencia, 2009-2020. Right: creation of Bioluminescent Urban Screens and domestic use. Right: photo of the Bioluminescent Urban Screens, Valencia, 2020. Photo: Research with Agusti Fontarnau, to obtain living elements, biology production and living spaces that can be used for architecture (photo Alberto T. Estevez).



Bioluminescent topologies by (Abdallah and Estevez, 2023).



The Two Bio-receptive tiles designed following two patterns of reaction: a) upon for sharp and localized cellular immobilization for the multi-scale targeted mixed algal cultures; each tile is 3D printed with white polypropylene (PP) and is followed by the Microscopy study (revealing the different hosted strains on each tile from the five strains of algae ranging from filamentous to unicellular in the mixed algal culture. (Abdallah and Estevez, 2023).

Estevez's visionary approach has been synergized with the scientific rigor of Yomna K. Abdallah, whose work focuses on developing bio-receptive surfaces and materials for construction applications in the built environment. Together, their collaborative research, as demonstrated in numerous projects and published studies, has revealed how specific geometric designs and surface micromorphology significantly influence the adhesion and viability of hosted microorganisms. This effect is especially pronounced for unicellular microalgae and cyanobacteria, whose morphology and scale are well-suited to bacterial and algal strains intended for bioluminescent urban screens. Their findings open new avenues in creating biologically integrated architectural elements, where the morphology of construction surfaces is precisely tailored to support and sustain these bioluminescent organisms, enhancing both environmental compatibility and urban aesthetics.

This robust foundation in research and design has been instrumental in developing the urban bioluminescent screens, serving as a critical basis for the creation of bio-receptive architectural elements intended for integration within the built environment. The bio-receptive tiles were meticulously designed through algorithmic modeling that simulated the chemotactic behavior of the bacterial strain *Allivibrio fischeri*. These tiles were then domestically fabricated using IBAG's 3D printers, employing various materials to assess their potential to enhance the bio-receptivity of the surfaces. This approach not only refined the design parameters but also provided empirical insights into the material and structural properties most conducive to supporting and sustaining bioluminescent organisms on architectural surfaces.



Chemotactic-simulated Based Bio-receptive tile Variations. (Abdallah and Estevez, 2023).





Abbildungen 21 und 22. Auf der vorherigen Seite und oben: Poster mit der Erläuterung zum Panel und das 3D-gefertigte bioreceptive Panel, beide ausgestellt auf der Konferenz der Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, SIGraDi 2024 Biodigital Intelligent Systems, die im November 2024 an der Universitat Internacional de Catalunya in Barcelona stattfand.

Literaturverzeichnis

- [1] Atasu, A.; Duran, S.; Van Wassenhove, L.N. (2021). Die Schattenseiten der Solarenergie. *Harvard Business Review*. Online verfügbar: <https://hbr.org/2021/06/the-dark-side-of-solar-power> (abgerufen am 18. Juni 2025).
- [2] Kuby Renewable Energy Ltd. (2019). Die positiven und negativen Umweltauswirkungen von Solarmodulen. [online] *Kubyenergy.ca*. Online verfügbar: <https://kubyenergy.ca/blog/the-positive-and-negative-environmental-impacts-of-solar-panels> (abgerufen am 18. Juni 2025).
- [3] Wind Energy Technologies Office. (2024). Vorteile und Herausforderungen der Windenergie. [abgerufen am 18. Juni 2025] *Energy.gov*. Online verfügbar: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy> (abgerufen am 18. Juni 2025).
- [4] Statkraft.com. (2024). Mythos widerlegt: „Windkraft ist unzuverlässig, ineffizient und schädlich für die Natur“. Online verfügbar: <https://www.statkraft.com/newsroom/explained/mythbusting-wind-power-is-unreliable-inefficient-and-harmful-to-nature/> (abgerufen am 18. Juni 2025).
- [5] Wood, J. (2023). Kosten der Windenergie: Warum die Branche mit Kostenproblemen zu kämpfen hat. [online] *Weltwirtschaftsforum*. Online verfügbar: <https://www.weforum.org/stories/2023/11/why-offshore-wind-cost-pressures-rising/> (abgerufen am 18. Juni 2025).
- [6] Estévez, A.T. (2016). Auf dem Weg zu genetischen posthumanen Grenzen in Architektur und Design. In *ACADIA 2016 Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines*; Velikov, K., Ahlquist, S., del Campo, M., Thün, G., Hrsg.; ACADIA/Taubman College of Architecture and Urban Planning; University of Michigan: Ann Arbor, 450–459. ISBN 978-0-692-77095-5. Online verfügbar: <https://www.papers.cumincad.org> (abgerufen am 5. August 2025).
- [7] Abdallah, Y.K.; Estevez, A.T.; Tantawy, D.E.D.M.; Ibraheem, A.M.; Khalil, N.M. (2019). Einsatz von Laccase-produzierendem *Aspergillus sydowii* NYKA 510 als kathodischer Biokatalysator in einer autarken mikrobiellen Brennstoffzelle zur Beleuchtung. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 29, 1861–1872. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [8] Jaafari, A.A.Q.; Roznowski, V.; Estévez, A.T.; Abdullah, Y.K. (2021). Autarke Bioelektrizitätssysteme in der Architektur: Einsatz von *Spirulina platensis* in photosynthetischen mikrobiellen Brennstoffzellen zur Erzeugung von Bioelektrizität für Haushalte und Städte durch ein diffusionsbegrenztes Aggregationsmuster. In: *Sustainable Engineering Technologies and Architectures*, AIP Publishing LLC.: Melville, 1–18. [Google Scholar] [CrossRef]
- [9] Hassan, M.; Kanwal, S.; Singh, R.S.; Sa, M.A.; Anwar, M.; Zhao, C. (2023). Aktuelle Herausforderungen und Zukunftsperspektiven im Zusammenhang mit der Konfiguration mikrobieller Brennstoffzellen zur gleichzeitigen Energieerzeugung und Abwasserbehandlung. *Int. J. Hydrogen Energy*, 50, 323–350. [Google Scholar] [CrossRef]

- [10] Abdallah, Y.K.; Estevez, A.T. (2021). Bioaktive Geräte als autarke Systeme zur Energieerzeugung in der Architektur. *J. Green Build.*, 16, 3–22. [Google Scholar] [CrossRef]
- [11] Mitiouchkina, T.; Mishin, A.S.; Somermeyer, L.G.; Markina, N.M.; Chepurnyh, T.V.; Guglya, E.B.; Karataeva, T.A.; Palkina, K.A.; Shakhova, E.S.; Fakhranurova, L.I.; et al. (2020). Pflanzen mit genetisch kodierter Autolumineszenz. *Nat. Biotechnol.*, 38, 944–946. [Google Scholar] [CrossRef]
- [12] Kotlobay, A.A.; Sarkisyan, K.S.; Mokrushina, Y.A.; Marcet-Houben, M.; Serebrovskaya, E.O.; Markina, N.M.; Somermeyer, L.G.; Gorokhovatsky, A.Y.; Vvedensky, A.; Purtov, K.V.; et al. (2018). Genetisch kodierbares biolumineszentes System aus Pilzen. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 115, 12728–12732. [Google Scholar] [CrossRef]
- [13] Estévez, A.T. (2005). Proyecto Barcelona Genética. *Metalocus*, 017, 162–165, Madrid / Estévez, A.T. (2006). Genetisches Barcelona-Projekt: Kulturelle und lichtechnische Implikationen“. Kap. in VV. AA., *Urban Nightscape 2006*, 86–88, Athen, Internationale Beleuchtungskommission / Estévez, A.T.; Dollens, D. (2007). Die genetische Erzeugung biolumineszenter Pflanzen für den städtischen und häuslichen Gebrauch. *Leonardo*, 40, 18. Online verfügbar: <https://muse.jhu.edu/article/209698> (abgerufen am 5. August 2025). [CrossRef]
- [14] RoyalDanishAcademy.com. BioLum|Det Kongelige Akademi. (2024). Online verfügbar: <https://royaldanishacademy.com/en/case/biolum> (abgerufen am 21. Dez. 2024).
- [15] Malekpour, A.; Chen, X. (2022). Druckbarkeit und Zellviabilität beim extrusionsbasierten Bioprinting aus experimenteller, rechnergestützter und maschinell lernender Perspektive. *J. Funct. Biomater.*, 13, 40. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [16] Thomsen, R.; Tamke, M.; Mosse, A.; Jakob, S.; Bradshaw, H.; Buchwald, F.; Mosshammer, M. (2021). Imprimer la Lumière: 3D-Druck mit Biolumineszenz für architektonische Materialität. In: Proceedings of the 2021 DigitalFUTURES, Shanghai, China, 3.–4. Juli 2021. *Zenodo* (CERN – Europäische Organisation für Kernforschung). [Google Scholar] [CrossRef]
- [17] Tyse, G.; Tamke, M.; Thomsen, M.R.; Mosse, A.F. (2022). Biolumineszente Mikroarchitekturen: Zeitliches Planungsdesign, ein öko-metabolistischer Ansatz für Biodesign. *Arch. Struct. Constr.*, 2, 471–479. [Google Scholar] [CrossRef]
- [18] Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T. (2022). Biomaterialien und Architektur, eine mögliche Zukunft: Bioprinting-Architektur. *J. Regen. Med.*, 11, 1000210. Online verfügbar: <https://spanish.scitechnol.com/abstract/biomaterials-architecture-a-possible-future-bio-printing-architecture-18989.html> (abgerufen am 25. August 2025).
- [19] Estevez, A.T.; Abdallah, Y.K. (2024). Biomimetischer Ansatz zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Stabilität eines selbstmineralisierenden Hydrogels aus zweibaschem Calciumphosphat, Natriumalginat und Gelatine als Knochenersatz- und Strukturbaumaterial. *Processes*, 12, 944. [Google Scholar] [CrossRef]

- [20] Chen, J.; Fan, Y.; Dong, G.; Zhou, H.; Du, R.; Tang, X.; Ying, Y.; Li, J. (2023). Entwurf biomimetischer Gerüste für das Hautgewebe-Engineering. *Biomater. Sci.*, 11, 3051–3076. [Google Scholar] [CrossRef]
- [21] Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T. (2023). 3D-gedruckte bioreceptive Reaktions-Diffusions-Kacheln (Gierer-Meinhardt-Modell) zur passiven Immobilisierung von Algenstämmen in verschiedenen Größenordnungen. *Buildings*, 13, 1972. [Google Scholar] [CrossRef]
- [22] Scheerer, S.; Gomez, F.; Lloyd, D. (2006). Biolumineszenz von *Vibrio fischeri* in kontinuierlicher Kultur: Optimale Bedingungen für Stabilität und Intensität der Lichtemission. *J. Microbiol. Methods*, 67, 321–329. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [23] Li, Z., Yao, L., Kong, L. und Liu, H. (2008). Stromerzeugung mittels einer mikrobiellen Brennstoffzelle mit Trennwänden, die sich gut stapeln lässt. *Bioresource Technology*, [online] 99(6), 1650–1655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.003>.
- [24] Domenico Delle Side, Nassisi, V., Pennetta, C., Pietro Alifano, Marco Di Salvo, Adelfia Talà, Aleksei Chechkin, Seno, F. und Trovato, A. (2017). Eintritt und Auslöschung bakterieller Biolumineszenz: ein dynamisches Modell für die durch Aquorum-Sensing vermittelte Eigenschaft. *Royal Society Open Science*, 4(12), 171586–171586. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.171586>.
- [25] Bourgois, J.-J., Sluse, F.E., Baguet, F. und Mallefet, J. (2001). *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 33(4), 353–363. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1010615508916>.
- [26] Min, B., Cheng, S. und Logan, B.E. (2005). Stromerzeugung mit mikrobiellen Brennstoffzellen mit Membran und Salzbrücke. *Water Research*, 39(9), 1675–1686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.02.002>.
- [27] R. Ghalloussi, W. Garcia-Vasquez, L. Chaabane, L. Dammak, C. Larchet, S. Deabate, E. Nevakshenova, Nikonenko, V. und Grande, D. (2013). Alterung von Ionenaustauschmembranen in der Elektrodialyse: Eine strukturelle und physikalisch-chemische Untersuchung. *Journal of Membrane Science*, 436, 68–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.02.011>.



Eingang zur UIC-Absolventenhalle (Seminarraum) und zum Ausstellungsraum der Biolampen und Biopaneln vom 21 bis 23 Januar 2026, mit Pandora-Verweis.

Hier ist der zweite Teil dieses Kapitels mit dem Titel „PANDORA-Projekt“, als eigenständiger Zweig des BioLumCity-Projekts, aus der Forschungsgruppe „Genetic Architectures“ von Alberto T. Estévez am iBAG-UIC Barcelona (Barcelona, Spanien).

PANDORA-Projekt: Biolumineszente Systeme für nachhaltige Architektur und Stadtgestaltung

1. Zusammenfassung

Das PANDORA-Projekt untersucht Biolumineszenz als radikal nachhaltige Alternative zu herkömmlichen städtischen Beleuchtungssystemen. Auf der Grundlage von Mikrobiologie, Molekularbiologie, Pflanzenbiotechnologie und architektonischem Design zielt das Projekt darauf ab, lebende Systeme, die sichtbares Licht emittieren können, in städtische und architektonische Umgebungen zu integrieren.

Im Berichtszeitraum hat das Projekt eine fortgeschrittene experimentelle Phase erreicht. Stabile Kulturen des Meeresbakteriums *Aliivibrio fischeri* wurden etabliert und für eine nachhaltige Biolumineszenz optimiert. Parallel dazu wurden Fortschritte in der Pflanzenbiotechnologie erzielt, wobei der Schwerpunkt auf In-vitro-Kultivierungssystemen für Modell- und Zierpflanzenarten als Grundlage für zukünftige transplastomische Ansätze lag. Es wurden molekularbiologische Arbeitsabläufe implementiert, um einen Multigen-Transfer zu ermöglichen, der speziell auf das für die bakterielle Biolumineszenz verantwortliche Lux-Operon abzielt.

Insgesamt bestätigen die bisher abgeschlossenen Arbeiten die wissenschaftliche Machbarkeit biolumineszenter Systeme für architektonische Anwendungen und schaffen eine solide experimentelle und infrastrukturelle Basis für die nächste Phase der translationalen Entwicklung.

2. Wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Kontext

Das Projekt steht im Einklang mit dem Übereinkommen über die biologische Vielfalt und der Europäischen Biodiversitätsstrategie für 2030 und legt den Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit, verantwortungsvolle Biotechnologie und stadtökologische Integration. Die Beleuchtung stellt eine entscheidende Schnittstelle zwischen Energieverbrauch, urbaner Lebensqualität und Umweltauswirkungen dar. Biolumineszenz bietet eine nicht-elektrische, energiearme und klimaneutrale Alternative, die die Art und Weise, wie Licht in Städten erzeugt und verteilt wird, neu definieren könnte.

Durch die Kombination von Biotechnologie und Architekturforschung befasst sich PANDORA sowohl mit wissenschaftlichen Herausforderungen – wie stabiler Lichterzeugung und genetischer Regulation – als auch mit gesellschaftlichen Bedürfnissen, darunter Energieeffizienz, ästhetische Aufwertung und ökologische Verantwortung.

3. Projektstruktur und Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsaktivitäten sind in drei eng miteinander verzahnte Bereiche gegliedert:

1. **Mikrobiologie und Optimierung der Biolumineszenz**
2. **Molekularbiologie und Multigen-Engineering**
3. **Pflanzenbiotechnologie und In-vitro-Kultivierung**

Diese Forschungslinien laufen auf das langfristige Ziel hinaus, autonome, biologisch basierte Beleuchtungssysteme zu entwickeln, die für den Einsatz in Städten geeignet sind.

4. Forschungsschwerpunkt Mikrobiologie

4.1 Stabile Kultivierung von *Aliivibrio fischeri*

Es ist gelungen, eine stabile, reproduzierbare Kultur von *A. fischeri* zu etablieren, die Biolumineszenz im sichtbaren Spektrum zeigt. Die Biolumineszenz wird über Quorum Sensing reguliert, wodurch die Populationsdichte und die Umgebungsbedingungen entscheidende Variablen darstellen.

4.2 Optimierung der Kulturmedien

Drei Medien wurden systematisch evaluiert:

- **Luria-Bouillon (LB):** Trotz NaCl-Zugabe suboptimal; unzureichende Ionenkomplexität.
- **Tryptic Soy Broth (TSB):** Unterstützte das Wachstum, aber nur begrenzte Biolumineszenz.
- **Marine-Bouillon:** Bietet optimales Wachstum, optimale Intensität und optimale Dauer der Biolumineszenz.

Marine-Bouillon wurde aufgrund ihrer dem Meerwasser ähnlichen ionischen Zusammensetzung als Referenzmedium ausgewählt.

4.3 Umgebungsparameter

- **Temperatur:** Optimales Wachstum bei 26 °C; stabilste Biolumineszenz bei 24 °C ± 2 °C.
- **pH-Wert:** Optimal bei pH 6,8.
- **Sauerstoffversorgung:** Als limitierender Faktor für eine anhaltende Lichtemission identifiziert.

4.4 Autonome Sauerstoffversorgungssysteme

Zwei Systeme befinden sich in der Entwicklung:

- Ein **fermenterbasierter Bioreaktor** für kontrollierte Belüftung und Parametersteuerung.
- Ein **passives poröses Membransystem**, das die Sauerstoffdiffusion ohne Stromzufuhr ermöglicht.

Diese Systeme zielen darauf ab, die Lebensdauer der Kultur zu verlängern und Kontaminationsrisiken zu minimieren.

4.5 Wachstumskurve und Quorum Sensing

Es wurden Wachstumskurven erstellt, um die Exponentialphase zu bestimmen, die mit dem Höhepunkt der Biolumineszenz einhergeht. Die Messung der optischen Dichte in marinen Medien erforderte methodische Anpassungen aufgrund von Artefakten durch den Salzverbrauch.

4.6 Klonale Selektion von Stämmen mit hoher Biolumineszenz

Durch phänotypisches Screening konnten *A. fischeri*-Klone mit deutlich erhöhter Lichtleistung und Stabilität isoliert werden. Ausgewählte Stämme werden derzeit für die Genomsequenzierung vorbereitet, um Mutationen oder regulatorische Variationen zu identifizieren, die mit der verbesserten Leistung in Verbindung stehen.

4.7 Untersuchungen zur Eisenverfügbarkeit

Derzeit laufen systematische Studien zur Bewertung des Einflusses der Eisenkonzentration auf:

- Biolumineszenzintensität
- Siderophor-Produktion
- Biofilmbildung

Vorläufige Hypothesen deuten auf eine optimale Leistung bei mittleren Eisenkonzentrationen hin, wobei sowohl bei Mangel als auch bei Überschuss eine Hemmung auftritt.

4.8 Hypothetische Symbiose mit *Candida albicans*

Explorative Arbeiten deuten auf mögliche mutualistische oder kompetitive Wechselwirkungen zwischen *C. albicans* und *A. fischeri* unter eisenarmen Bedingungen hin. Diese Studien eröffnen neue Wege zum Verständnis polymikrobieller Systeme und Mechanismen der Ressourcenverteilung, die für die langfristige Stabilität der Biolumineszenz relevant sind.

4.9 Untersuchungen zur Materialinteraktion

- **Baumwolle (100 % ungebleicht):** Hohe Feuchtigkeitsspeicherung unterstützt eine anhaltende Biolumineszenz.
- **Polyester:** Fördert die Adhäsion von Bakterien und die Biofilmbildung, schränkt jedoch die langfristige Aktivität aufgrund geringer Hygroskopizität ein.

Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Materialauswahl bei biolumineszenten architektonischen Oberflächen.

5. Forschungsschwerpunkt Molekularbiologie

5.1 Infrastruktur für die bakterielle Transformation

Kompetente *E. coli*-Stämme und Transformationsprotokolle wurden standardisiert. Eine Plasmidbibliothek (pUC18, pUC19, pXGAL) wurde aufgebaut.

5.2 Lux-Operon-Engineering

Das bakterielle LuxCDABEG-Operon (~6,8 kb) wurde als Gen von Interesse ausgewählt. pUC19 wurde als das am besten geeignete Klonierungsgerüst identifiziert.

5.3 Entwurf eines Shuttle-Plasmids

Es wurde ein hybrides Shuttle-Plasmid entworfen, um die Expression sowohl in prokaryotischen als auch in eukaryotischen Systemen zu ermöglichen, das Folgendes enthält:

- Chloroplasten-Targeting-Sequenzen
- Starke konstitutive Promotoren (CMV)
- Regulations- und Selektionselemente

Dieses Design ist ein entscheidender Meilenstein auf dem Weg zur Chloroplastentransformation.

6. Pflanzenbiotechnologie und *In-vitro*-Kulturlinie

6.1 Modellarten

In-vitro-Kultivierungsprotokolle wurden erfolgreich etabliert für:

- *Nicotiana tabacum*
- *Arabidopsis thaliana*

Die Protokolle umfassen die Sterilisierung der Samen, die Keimung, die klonale Vermehrung, die Bewurzelung und die Akklimatisierung.

6.2 Akklimatisierung an Ex-vitro-Bedingungen

Ein Protokoll zur schrittweisen Akklimatisierung wurde optimiert, um den Transplantationsschock zu verringern und die Lebensfähigkeit der Pflanzen außerhalb steriler Bedingungen sicherzustellen.

6.3 Direkte Organogenese

Hormonbehandlungen mit Auxinen und Cytokinin werden optimiert, um eine direkte Sprossregeneration aus Blattexplantaten zu induzieren, eine Voraussetzung für die Chloroplastentransformation.

6.4 Zierpflanzenarten

Es wurden Protokolle für Arten von architektonischem Interesse angepasst, darunter *Ipomoea*, *Dianthus*, *Calendula* und *Petunia*. Zu den Auswahlkriterien gehörten ästhetischer Wert, Biomasse-Leistung, ökologische Anpassungsfähigkeit und die Vererbung mütterlicher Chloroplasten.

7. Architektonische und städtische Anwendungen

Ein wichtiger Meilenstein in der translationalen Forschung ist die Veröffentlichung des Artikels: „BioLumCity: 3D-gedruckte biolumineszente Stadtbildschirme unter Verwendung von *Aliivibrio fischeri*-Bio-Tinte als passive Stadtbeleuchtung“. Diese Arbeit demonstriert die Machbarkeit der Integration lebender biolumineszenter Systeme in 3D-gedruckte architektonische Elemente und untermauert die Anwendbarkeit des Projekts über das Labor hinaus.

8. Aktueller Stand und Reifegrad

- Die Laborinfrastruktur ist voll funktionsfähig.
- Stabile mikrobielle und pflanzliche Systeme wurden etabliert.
- Gentechnische Arbeitsabläufe entworfen und teilweise umgesetzt.

- Proof-of-Concept-Anwendungen für die Architektur validiert.

Das Projekt befindet sich in einem fortgeschrittenen experimentellen Stadium und geht in die Phase der integrativen Prototypen über.

9. Strategischer Ausblick

Die nächste Phase konzentriert sich auf:

- Genetische Optimierung der Intensität und Dauer der Biolumineszenz.
- Transformation von Chloroplasten und Cyanobakterien.
- Validierung der Langzeitstabilität und der biologischen Sicherheit.
- Maßstabsgetreue architektonische Demonstrationsmodelle.

PANDORA zeichnet sich durch starke wissenschaftliche Kohärenz, interdisziplinäre Integration und hohes Wirkungspotenzial aus und positioniert die UIC Barcelona als führend in der biodigitalen und biolumineszenten Architekturforchung.

10. Abschließende Erklärung

Das PANDORA-Projekt hat Biolumineszenz als neuartige, bio-nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Beleuchtungssystemen untersucht, mit besonderem Fokus auf ihrer potenziellen Integration in architektonische und städtische Umgebungen. Durch einen interdisziplinären Ansatz, der Mikrobiologie, Molekularbiologie, Pflanzenbiotechnologie und Architekturforchung vereint, hat das Projekt eine solide wissenschaftliche und technische Grundlage für die Entwicklung lebender, energieautonomer Lichtemissionssysteme geschaffen.

Im Laufe des Projekts gelang es, ein stabiles Kultivierungssystem für das Meeresbakterium *Aliivibrio fischeri* zu etablieren, das eine gleichmäßige Biolumineszenz im sichtbaren Spektrum ermöglicht. Eine umfassende Optimierung der Kulturbedingungen – einschließlich Wachstumsmedien, Salzgehalt, Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffverfügbarkeit – zeigte, dass Marine Broth, ein leicht saurer pH-Wert ($\approx 6,8$) und Temperaturen um 24–26 °C optimale Bedingungen sowohl für das Bakterienwachstum als auch für eine anhaltende Lichtemission bieten. Die entscheidende Rolle von Sauerstoff bei der durch Luciferase vermittelten Biolumineszenzreaktion führte zur Entwicklung autonomer Sauerstoffanreicherungsstrategien, darunter kontrollierte Bioreaktorsysteme und passive poröse Membranvorrichtungen, die ohne externe Stromzufuhr funktionieren.

Parallel dazu wurden Wachstumskurven erstellt, um die Exponentialphase zu identifizieren, die mit maximaler Biolumineszenz einhergeht, und Klonauswahlstrategien ermöglichten die Isolierung von *A. fischeri*-Stämmen mit verstärkter und stabilerer Lichtleistung. Diese Stämme stellen einen bedeutenden Schritt in Richtung biotechnologischer Robustheit dar und werden derzeit für die Genomanalyse vorbereitet, um die genetischen Determinanten zu identifizieren, die der verbesserten Biolumineszenzleistung zugrunde liegen.

Das Projekt befasste sich zudem mit dem Einfluss von Eisen in der Umwelt auf die bakterielle Physiologie, Biolumineszenz, Siderophorproduktion und Biofilmbildung. Es wurden Versuchsanordnungen entwickelt, um Eisen als zentralen Regulationsfaktor zu untersuchen, wobei seine doppelte Rolle als essenzieller Mikronährstoff und als potenzielle Quelle für oxidativen Stress bei hohen Konzentrationen aufgezeigt wurde. Darüber hinaus wurden im Rahmen explorativer Forschung mögliche Wechselwirkungen zwischen

A. fischeri und *Candida albicans* in eisenarmen Umgebungen vorgeschlagen und konzeptionell analysiert, was neue Perspektiven auf polymikrobielle Systeme und metabolische Kooperation oder Konkurrenz im Hinblick auf die langfristige Stabilität der Biolumineszenz eröffnete.

Materialbezogene Untersuchungen zeigten zudem, dass die Wahl des Substrats eine entscheidende Rolle für die Biolumineszenzleistung spielt. Es zeigte sich, dass hydrophile, hygroskopische Materialien wie ungebleichte Baumwolle eine anhaltende bakterielle Aktivität und Lichtausstrahlung begünstigten, während hydrophobe Materialien wie Polyester zwar die Anhaftung und Biofilmbildung förderten, jedoch die langfristige Lebensfähigkeit einschränkten. Diese Erkenntnisse liefern wesentliche Kriterien für die Gestaltung biolumineszenter architektonischer Oberflächen.

Ergänzend zu den mikrobiologischen Arbeiten wurde eine umfassende In-vitro-Pflanzenbiotechnologie-Plattform unter Verwendung von *Nicotiana tabacum* und *Arabidopsis thaliana* als Modellarten etabliert. Protokolle für die Saatgutsterilisation, Keimung, klonale Vermehrung, Bewurzelung, direkte Organogenese und Ex-vitro-Akklimatisierung wurden optimiert, um reproduzierbares und gesundes Pflanzenmaterial zu gewährleisten. Diese Systeme bilden die Grundlage für zukünftige Strategien zur Transformation von Chloroplasten (Transplastomik), die darauf abzielen, bakterielle Biolumineszenz-Stoffwechselwege in höheren Pflanzen zu exprimieren. Darüber hinaus wurden Anbauprotokolle für ausgewählte Zierpflanzenarten von architektonischem Interesse angepasst, um ihre Eignung für zukünftige städtische und landschaftliche Anwendungen sicherzustellen.

Aus angewandter Perspektive gipfelte das Projekt in der Veröffentlichung des Forschungsartikels „BioLumCity: 3D Printed Bioluminescent Urban Screens Employing *Aliivibrio fischeri* Bioink as Passive Urban Lights“ in *Applied Microbiology* (2025), der die Machbarkeit der Integration biolumineszenter Organismen in 3D-gedruckte architektonische Elemente als passive Beleuchtungssysteme demonstriert. Diese Arbeit stellt einen wichtigen Meilenstein in der translationalen Forschung dar und schlägt eine Brücke zwischen Laborforschung und architektonischer Umsetzung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das PANDORA-Projekt die wissenschaftliche Machbarkeit biolumineszenter Systeme als nachhaltige Lichtquellen erfolgreich validiert und die für ihre zukünftige Entwicklung notwendigen experimentellen, technologischen und konzeptionellen Grundlagen geschaffen hat. Die erzielten Ergebnisse positionieren die Biolumineszenz nicht als spekulatives Konzept, sondern als praktikable biologische Technologie mit klarem Potenzial, zu energieeffizienten, ökologisch integrierten und ästhetisch innovativen städtischen Umgebungen beizutragen.

Die bisher geleistete Arbeit bestätigt, dass biolumineszente Systeme nicht mehr spekulativ, sondern experimentell realisierbar sind. PANDORA schafft die wissenschaftlichen, technischen und konzeptionellen Grundlagen, die erforderlich sind, um lebendes Licht in eine funktionale Komponente zukünftiger nachhaltiger Städte zu verwandeln.

5. Referenzen

- Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T.; Balfagón Martin, A.; Serra Soriano, M. (2025). BioLumCity: 3D-gedruckte biolumineszente Stadfliesen unter Verwendung von *Allivibrio fischeri*-Bio-Tinte als passive Stadtbeleuchtung. *Appl. Microbiol.*, 5(4), 105. ISSN: 2673-8007. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5040105>.
- Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T. (2023). Biomaterials Research-Driven Design Visualized by AI Text-Prompt-Generated Images, *Designs*, 7(2). ISSN: 2411-9660.
- Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T. (2021). 3D-gedruckte biodigitale Lehmziegel. *Biomimetics*, 6(4). ISSN: 2313-7673.
- Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T. (2021). Bioaktive Geräte als autarke Systeme zur Energieerzeugung in der Architektur. *Journal of Green Building*, 16(2), 3–22. ISSN: 1552-6100.
- Abdallah, Y.K.; Estévez, A.T.; Tantawy, D.M.; Ibraheem, A.M.; Khalil, N.M. (2019). Einsatz von Laccase-produzierendem *Aspergillus sydowii* NYKA 510 als kathodischer Biokatalysator in einer autarken mikrobiellen Brennstoffzelle für Beleuchtungszwecke. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(12), 1861–1872. ISSN: 1017-7825.
- Abdallah, Y.K. (2015). Konzeptionelle Umsetzung vom Entwurf bis zur Produktion – Fallstudie zum Gewinnerprojekt des internationalen Wettbewerbs „Optima+“ und des Workshops zur digitalen Fertigung. *The International Journal of Science & Technology*, 3(7), 65–75. ISSN: 2321-919X.
- Adobkar, I.; Ahmed, M.S.; Elshabed, M. (2012). Pflanzengewebekulturmedien. Annarita L. und MR Laura (Hrsg.). Aktuelle Fortschritte in der Pflanzen-In-vitro-Kultur. *IntechOpen*. DOI, 10, 50569.
- Aguilar, M.; Melgarejo, L.M.; Romero, M. (2012). *FITOHORMONAS*. Labor für Pflanzenphysiologie und -biochemie. Fachbereich Biologie. Nationale Universität von Kolumbien.
- Andrews, S.C.; Robinson, A.K.; Rodríguez-Quifones, F. (2003). Bakterielle Eisenhomöostase. *FEMS Microbiology Reviews*, 27(2-3), 215-237.
- Baumann, P.; Baumann, L.; Mandel, M. (1971). Taxonomie mariner Bakterien: Die Gattung *Beneckea*. *Journal of Bacteriology*, 107(2), 268-294.

- Bienabe, E.; Hearne, R.R. (2006). Öffentliche Präferenzen für den Erhalt der Biodiversität und landschaftliche Schönheit im Rahmen von Zahlungen für Umweltdienstleistungen. *Forest Policy and Economics*, 9(4), 335-348.
- Boynton, J.E.; Gillham, N.W.; Harris, E.H.; Hosler, J.P.; Johnson, A.M.; Jones, A.R.; ... Sanford, J.C. (1988). Chloroplastentransformation in *Chlamydomonas* mit Hochgeschwindigkeits-Mikroprojektilen. *Science*, 240(4858), 1534–1538.
- Cardozo, A.K.; Ortis, F.; Stirling, J.; Feng, Y.M.; Rasschaert, J.; Tonnesen, M.; ... Eizirik, D.L. (2005). Zytokine regulieren die Ca²⁺-ATPase 2b des sarkoendoplasmatischen Retikulums herunter und verbrauchen Ca²⁺ im endoplasmatischen Retikulum, was zur Induktion von Stress im endoplasmatischen Retikulum in β -Zellen der Bauchspeicheldrüse führt. *Diabetes*, 54(2), 452–461.
- Caza, M.; Kronstad, J.W. (19. November 2013). Gemeinsame und unterschiedliche Mechanismen der Eisenaufnahme durch bakterielle und pilzliche Pathogene des Menschen. *Front Cell Infect Microbiol.*, 3(80).
- Chilton, M.D.; Drummond, M.H.; Merlo, D.J.; Sciaky, D.; Montoya, A.L.; Gordon, M.P.; Nester, E.W. (1977). Stabile Einbindung von Plasmid-DNA in Zellen höherer Pflanzen: die molekulare Grundlage der Kronengallentumorentstehung. *Cell*, 11(2), 263-271.
- Csonka, L.N. (1989). Physiologische und genetische Reaktionen von Bakterien auf osmotischen Stress. *Microbiological Reviews*, 53(1), 121–147.
- Curtis, S.E.; Clegg, M.T. (1984). Molekulare Evolution von Chloroplasten-DNA-Sequenzen. *Molecular Biology and Evolution*, 1(4), 291-301.
- Daniell, H.; Lee, S.B.; Grevich, J.; Saski, C.; Quesada-Vargas, T.; Guda, C.; ... Jansen, R.K. (2006). Vollständige Chloroplastengenomsequenzen von *Solanum bulbocastanum*, *Solanum lycopersicum* und vergleichende Analysen mit anderen Solanaceae-Genomen. *Theoretical and Applied Genetics*, 112, 1503–1518.
- Deryabin, D.; Karimov, I. (2010). Merkmale der Reaktion natürlicher und rekombinanter lumineszierender Mikroorganismen in Gegenwart von Fe²⁺-Ionen. *Angewandte Biochemie und Mikrobiologie*, 46. 28–32. 10.1134/S0003683810010047.
- Dhingra, A.; Daniell, H. (2006). Chloroplastengentechnik mittels Organogenese oder somatischer Embryogenese. *Arabidopsis-Protokolle*, 245–262.
- Engebrecht, J.; Silverman, M. (1984). Identifizierung von Genen und Genprodukten, die für die bakterielle Biolumineszenz notwendig sind. *Proceedings National Academy of Sciences*, 81(14), 4154–4158.
- Estévez, A.T.; Abdallah, Y.K. (2022). Der neue Standard ist biodigital: Langlebige und elastische 3D-gedruckte biodigitale Lehmziegel. *Biomimetics*, 7. ISSN: 2313-7673.

- Estévez, A.T. (2020). Alberto T. Estévez: Genetic Barcelona Project, Barcelona (Spanien). *AV Proyectos*, 98, 52–52. ISSN: 1697-493X.
- Estévez, A.T. (2020). La naturaleza es la solución. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 23(105), 165–193. ISSN: 1668-0227.
- Forner, J.; Kleinschmidt, D.; Meyer, E.H.; Gremmels, J.; Morbitzer, R.; Lahaye, T.; ... Bock, R. (2023). Gezieltes Ausschalten eines konservierten pflanzlichen Mitochondriengens durch Genom-Editierung. *Nature Plants*, 9(11), 1818-1831.
- Gelvin, S.B. (2003). Agrobacterium-vermittelte Pflanzentransformation: Die Biologie hinter dem Werkzeug des „Gene-Jockeying“. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 67(1), 16–37.
- González, M.V.; López, M.; Valdes, A.E.; Ordas, R.J. (2009). Mikrovermehrung von drei Beerenobstarten unter Verwendung von Knotensegmenten aus im Freiland angebauten Pflanzen. *Annals of Applied Biology* 137(1), 73–78.
- Graf, J.; Ruby, E.G. (1998). Vom Wirt stammende Aminosäuren unterstützen die Vermehrung symbiotischer Bakterien. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(4), 1818–1822.
- Green, A.A.; McElroy, W.D. (1956). Kristalline Glühwürmchen-Luciferase. *Biochim Biophys Acta*, 20(1), 170–6. DOI: 10.1016/0006-3002(56)90275-x. PMID: 13315363.
- Hem, J.D. (1972). Chemie und Vorkommen von Eisen in natürlichem Wasser. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*.
- Hunková, J.; Libiakova, G., Gajdosova, A. (2016). Die Triebproliferationsfähigkeit ausgewählter Sorten von *Rubus* spp. unter dem Einfluss von Genotyp und Cytokinin-Konzentration. *J. Central Eur. Agric.*, 17(2), 379-390.
- Jouanneau, S.; Durand-Thouand, M.J.; Thouand, G. (2016). Entwicklung eines Toxizitäts-Biosensors auf Basis von *Aliivibrio fischeri*, eingekapselt in einer Einwegkarte. *Environmental science and pollution research international*, 23(5), 4340–4345.
- Karjadi, A.K.; Gunaeni, N. (Februar 2021). Der Einfluss der Sorte und der Explantatgröße auf die Vermehrung von Knoblauch (*Allium sativum* L.) unter Verwendung von Murashige- und Skoog-Medien. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 653(1), 012062. IOP Publishing.
- Lyell, N.L.; Dunn, A.K.; Bose, J.L.; Stabb, E.V. (Oktober 2010). Leuchtstarke Mutanten von *Vibrio fischeri* ES114 geben Aufschluss über die Bedingungen und Regulatoren, die die Biolumineszenz und die Expression des lux-Operons steuern. *J. Bacteriol.*, 192(19), 5103–14.
- Meighen, E.A. (1991). Molekularbiologie der bakteriellen Biolumineszenz. *Microbiological Reviews*, 55(1), 123–142.
- Murashige, T.; Skoog, F. (1962). Ein überarbeitetes Medium für schnelles Wachstum und Bioassays mit Tabakgewebekulturen. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497.

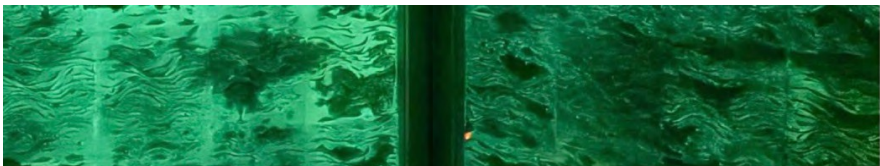
- Murashige, T. (1974). Pflanzenvermehrung durch Gewebekulturen. *Annual Review of Plant Physiology*, 25(1), 135–166.
- Nealson, K.H.; Hastings, J.W. (1979). Bakterielle Biolumineszenz: Ihre Steuerung und ökologische Bedeutung. *Microbiological Reviews*, 43(4), 496–518.
- Ruby, E.G. (1996). Das leuchtende Bakterium *Aliivibrio fischeri*: Ökologie und Symbiose. *Nature Reviews Microbiology*, 2(8), 623–637.
- Sasaki, T.; Toh-e, A.; Kikuchi, Y. (2000). Das Hefe-Protein Krr1p steht in physischer und funktioneller Wechselwirkung mit einem neuartigen essenziellen Kri1p, und beide Proteine sind für die Biogenese des 40S-Ribosoms im Nukleolus erforderlich. *Molecular and Cellular Biology*, 20(21), 7971–7979.
- Scotti, N.; Gargano, D.; Lenzi, P.; Cardi, T. (2011). Transformation des Plastidengenoms in höheren Pflanzen. *Historische technologische Entwicklungen in der Pflanzentransformation*. Bentham Science Pub., 123–145.
- Septer, A.N.; Stabb, E.V. (2012). Koordination des arc-Regulationssystems und pheromonvermittelte positive Rückkopplung bei der Steuerung des *Vibrio fischeri* lux-Operons. *PLoS one*, 7(11), e49590.
- Shin, N.; Katsumata, C.; Miura, T.; Tsutsumida, N.; Ichie, T.; Kotani, A.; ... Tokumoto, Y. (2023). Perspektive: Verbesserung der Genauigkeit von pflanzlichen Phänologiebeobachtungen sowie der Erkennung von Landbedeckung und Landnutzung durch optische Satellitenfernerkundung in den asiatischen Tropen. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1106723.
- Smith, A. (Hrsg.). (2012). *Bryophyte ecology*. Springer Science & Business Media.
- Storz, G.; Imlay, J.A. (1999). Oxidativer Stress. *Current Opinion in Microbiology*, 2(2), 188–194.
- Sugita, M.; Sugiura, M. (1996). Regulation der Genexpression in Chloroplasten höherer Pflanzen. *Plant Molecular Biology*, 32, 315–326.
- Tarek, N.; Estévez, A.T.; Abdallah, Y.K. (2021). Bakterielle Zellulose als Grundmaterial in der biodigitalen Architektur (zwischen Biomaterialentwicklung und struktureller Anpassung). *Journal of Green Building*, 16(2), 173-199. ISSN:1552-6100.
- Thode, S.K.; Kahlke, T.; Robertsen, E.M.; Haugen, P. (4. Februar 2015). Die unmittelbaren globalen Reaktionen von *Aliivibrio salmonicida* auf Eisenmangel. *BMC Microbiol.*, 15(1), 9. DOI: 10.1186/s12866-015-0342-7.
- Visick, K.L.; Foster, J.; Doino, J.; McFall-Ngai, M.; Ruby, E.G. (2000). Die lux-Gene von *Vibrio fischeri* spielen eine wichtige Rolle bei der Besiedlung und Entwicklung des Lichorgans des Wirts. *Journal of Bacteriology*, 182(16), 4578–4586.
- Zhao, X.; et al. (2016). Genetische und umweltbedingte Faktoren, die die Biolumineszenz bei *Aliivibrio fischeri* beeinflussen. *Journal of Bacteriology*, 198(10), 2763–2771.

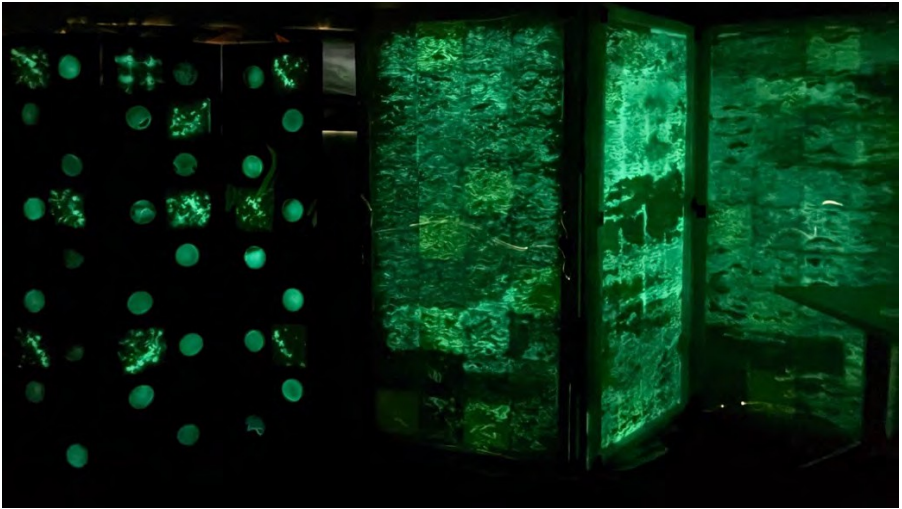


Poster und Seminar mit Präsentation der Ergebnisse durch die Mitglieder der Teams des BioLumCity-Projekts in der Graduation Hall der UIC Barcelona, 21. Januar 2026.



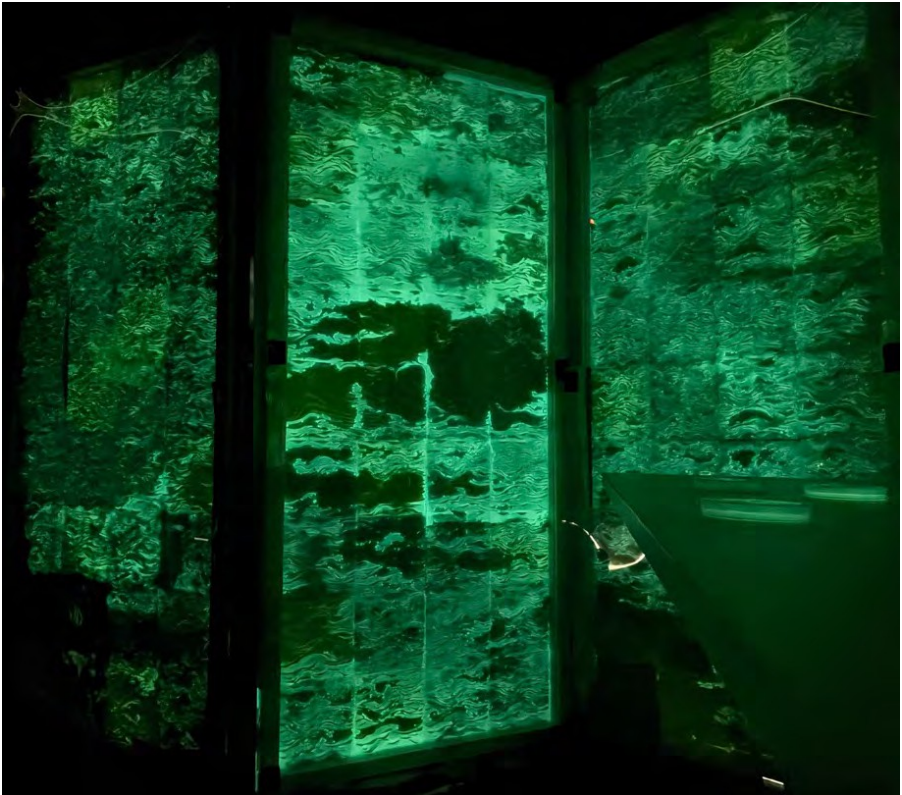
Unten: Detailansicht der biorezeptiven, biolumineszenten 3D-gedruckten Paneele in der Ausstellung, UIC Barcelona, 21. Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Wahrnehmung des menschlichen Auges).





Zwei verschiedene Designs für bioreceptive biolumineszente 3D-gedruckte Paneele in der Ausstellung, UIC Barcelona, 21.rd Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Wahrnehmung des menschlichen Auges). Von den Autoren.





Oben: bioreceptive biolumineszente 3D-gedruckte Paneele, **unten:** Biocontainer (links) und Biolampen (rechts) in der Ausstellung, UIC Barcelona, 21.Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Wahrnehmung des menschlichen Auges). Von den Autoren.



**CRAG-Gruppe
BioLumCity-
Projektbericht**

Jae-Seong Yang

Here is the final report for BioLumCity from the Jae-Seong Yang group at CRAG (Barcelona, Spain). This version includes only newly updated information and does not repeat content from the previous report.

Final report of the Project

Objective 1. Setup of a bioluminescent system in microalgae

In the previous report, we successfully tested the activity of luciferase (Luz) gene in *Chlamydomonas* with obtained luciferin from LightBio. This substrate is oxidized by enzyme Luz to emit light while produces caffeoyl pyruvate (**Figure 1**). In order to complete the bioluminescent reaction cycle, during the last year we have cloned and tested other three remaining enzymes H3H, HispS, and CPH with the same strategy of to clone the Luz gene. One strategy involved using a codon optimized for plants such as *Arabidopsis*, and the other for *Chlamydomonas*. The version optimized for plants was obtained from LightBio company, and the one for *Chlamydomonas* was synthesized. We have obtained genetic parts from the *C. reinhardtii* MoClo toolkit for cloning of luciferase gene into universal Golden Gate backbone vectors. The typical assembly reaction condition was 100 fmol of each insert and 50 fmol of the backbone, in a 10 μ l reaction in rCutSmart buffer with 0.5 units/ μ l restriction enzyme, 20 units/ μ l T4 ligase and 1 mM ATP. Transformation of TOP10 cells (ThermoFisher scientific) was performed by heat-shocking for 90s at 42 $^{\circ}$ C. For all genes, we generated the level 2 vector, containing CDS under the control of pAR promoter (HSP70-RBCS2 hybrid constitutive promoter) and RPL23 terminator. The antibiotic resistance gene is included in the vector in a separate expression cassette.

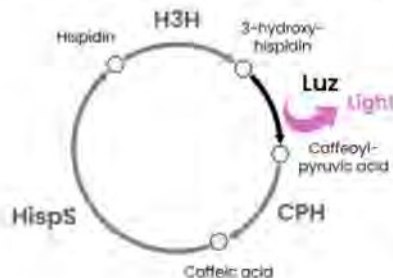


Figure 1. Simplified caffeic acid cycle from *N. nambii*. 3-hydroxyhispidin is oxidized to caffeoylpyruvic acid under light emission. The intermediate is first converted to caffeic acid and then to hispidin, before being recovered as the original substrate of the cycle. CPH, Caffeoylpyruvate hydrolase; HispS, Hispidin synthase; H3H, Hispidin-3-hydroxylase; Luz, Luciferase.

As we already know that Luz from *N. nambii* is functional in *Chlamydomonas*, we decided to test the activity of hispidin 3-hydroxylase (H3H), which converts hispidin into 3-hydroxyhispidin, the fungal luciferin. Instead of directly supplying luciferin, we provided hispidin as the substrate together with the H3H extract and the Luz microalgae extract. If H3H is active, light emission should be observed.

With the same transformation protocols, we selected the best transformants that express H3H enzyme (data not shown here). Then we mixed the extract of H3H transformants and nnLuz expressing transformants with hispidin. However, we found that nnH3H (from *N. nambii*) is not active in *Chlamydomonas*. Taking into account that the pCM2_nnH3H-F2A-

NL (HygR) vector yielded colonies with high reported NL activity it seems to be a matter of protein activity, maybe due to incorrect folding or post-translational modifications, but expression concerns cannot be completely ruled out without further proof (qPCR). In any case, nnH3H is not suitable for the incorporation of the FBP pathway in *Chlamydomonas* and other synthetic genes must be designed in its place.

To do this we checked the literature to see if some other H3H was used before for bioluminescent cycle. Current literature only describes the use of nnH3H (*Neonothopanus nambi*) and mcH3H (*Mycena chlorophos*), but there are more protein sequences available at UniProt. In the phylogenetic analysis presented by Kotlobay et al. (2018), several distinct clades within the order *Agaricales* exhibit bioluminescence (BL) (Figure 2). To maximize the likelihood of successful H3H expression, we selected two homologs from phylogenetically distant lineages: one from the *mycenoid* lineage (mcH3H) and one from the *Armillaria* lineage (amH3H, derived from *Armillaria mellea*). This strategy increases sequence diversity and thereby enhances the probability that at least one construct will express efficiently. In contrast, selecting closely related proteins may lead to similar expression or functional limitations, as observed for nnH3H.

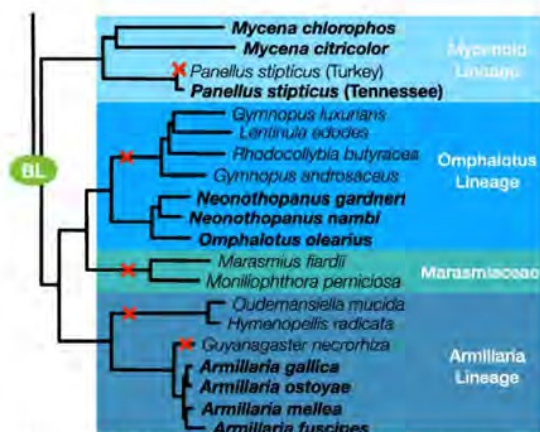


Figure 2. Phylogeny of Agaricales species. The rectangles with the gene names indicate where *luz*, *h3h*, and *hisp3* genes emerged as a result of duplication. An oval in the bioluminescence (BL) clade indicates the common ancestor of all bioluminescent species. (The figure and text were from the original paper Kotlobay et al. (2018)).

To test H3H from other species, we cloned these genes using synthetic DNA fragments designed to generate intronized and codon-optimized versions of the amH3H and mcH3H genes. Lyophilized gene fragments (1,000 ng) were resuspended in 20 μ L of nuclease-free water to obtain a final concentration of 50 ng/ μ L. Samples were briefly vortexed, collected by short centrifugation, and incubated at 37 $^{\circ}$ C for 1 h to ensure complete dissolution. Level 0 assemblies were performed to generate the pCM0_amH3H (B3) and pCM0_mcH3H (B3) constructs (Figure 3).

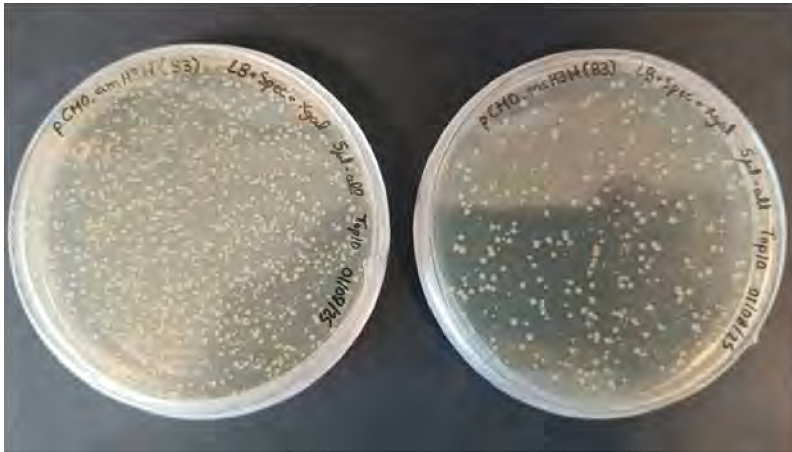


Abbildung 3. Erfolgreiche Transformation von pCM0 amH3H (B3) und pCM0 mch3H (B3) in *E. coli* Top10.

Von jeder Platte wurden zwei Kolonien entnommen und in 5 ml LB-Medium, ergänzt mit Spectinomycin, inokuliert, gefolgt von einer Inkubation über Nacht bei 37 °C. Um die erfolgreiche Klonierung zu bestätigen, wurden die Plasmide mittels Miniprep extrahiert und mit BbsI verdaut, was charakteristische Restriktionsmuster ergibt. Die erwarteten Verdauungsmuster wurden mit SnapGene simuliert, was die Identifizierung der korrekten Klone ermöglichte (**Abbildung 4**).

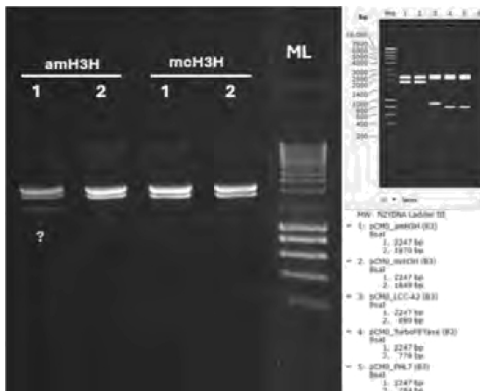


Abbildung 4. Restriktionsverdau-Analyse von pCM0_{amH3H} (B3) und pCM0_{mch3H} (B3).

Zur Erzeugung einer Expressionskassette für Cj/amyccorr/onas wurden die Konstrukte pCM2_{amH3H}-F2A-NL (HygR) und pCM2_{mch3H}-F2A-NL (HygR) assembliert. Die Genexpression wurde durch den pAR-Promotor gesteuert und durch den RPL23-Terminator beendet, wobei NL als selektierbares Markergen diente.

Die assemblierten Plasmide wurden in kompetente *E. coli* Top10-Zellen transformiert. Fünf Mikroliter der Assemblierungsreaktion wurden zu den Zellen gegeben und 20 Minuten auf Eis inkubiert.

min, followed by heat shock at 42 °C for 90 s. Cells were immediately transferred to ice for 2 min, after which 250 µL of SOC medium was added. The cultures were incubated at 37 °C for 1 h and then plated on LB agar supplemented with kanamycin. Plates were incubated overnight at 37 °C, and white, kanamycin-resistant colonies were obtained (**Figure 5**).

Two colonies from each transformation plate were selected and inoculated into 5 mL of LB medium containing spectinomycin, followed by overnight incubation at 37 °C. Plasmids were isolated the following day using an MN miniprep kit and eluted in 50 µL of nuclease-free water. DNA concentrations were measured using a NanoDrop spectrophotometer with 1.5 µL of each sample. To verify correct assembly, restriction digestion was performed in a total reaction volume of 10 µL, and the resulting digestion patterns were analyzed to identify correctly assembled constructs.

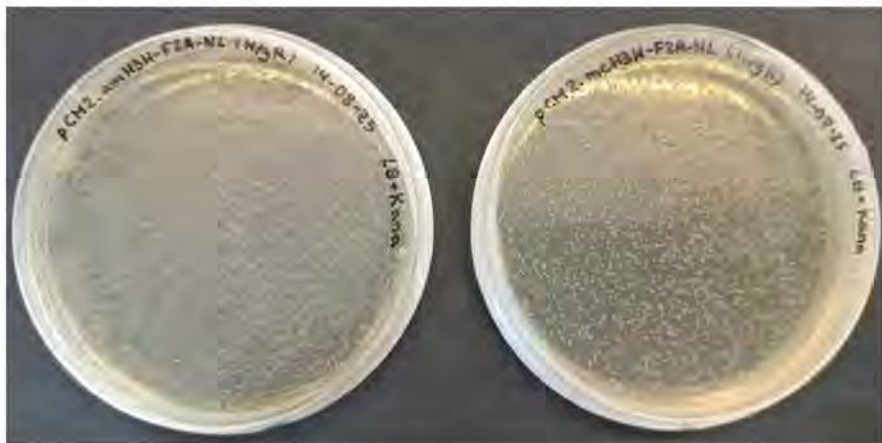


Figure 5. Successful Transformation pCM2_amH3H-F2A-NL (HygR) and pCM2_mCH3H-F2A-NL (HygR) in *E. coli* Top10.

For *Chlamydomonas* transformation, 5 mL of an LM8523 colony 2 culture were inoculated into 95 mL of TAP medium and incubated overnight at 23 °C under light level 3. Following transformation, 48 colonies for each construct (**Figure 6**) were picked into 96-well plates containing 200 µL of TAP medium per well and grown in a laboratory incubator at 23 °C under light level 3.

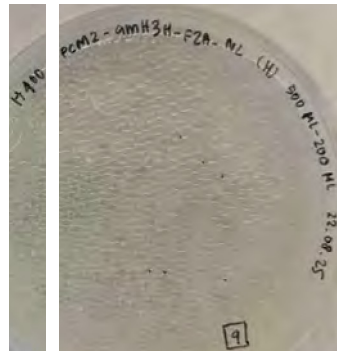
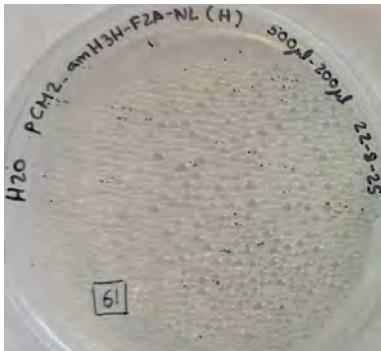


Abbildung 6. Erfolgreiche **Transformation** von pCM2 amH 3H-F2A-NL (HygR) und pCM2_mch3t1-F2A-NL (HygR) in *Chlamydomonas*.

Es wurden mehr als 50 Mikroalgen-Transformanten ausgewählt, und die Genexpression wurde mittels eines NanoLuc-Reporter-Assays untersucht. Die Kolonien mit der höchsten Expression wurden anschließend ausgewählt und in 6 ml TAP-Medium ausplattiert. Konkret wurden die amH3H-Stämme A2 und E1, die mch3H-Stämme A2 und E11 sowie der Luz-Kontrollstamm G6 unter kontinuierlicher Beleuchtung (Lichtintensität Stufe 3) bei 23 °C für 72 Stunden kultiviert.

Bei Proben, die sowohl Luz als auch H3H exprimieren, wurden 20 µl Luz-Proteinextrakt und 20 µl H3H-Proteinextrakt pro Vertiefung in einer schwarzen 96-Well-Platte mit transparentem Boden zusammengeführt, gefolgt von der Zugabe von 5 µl Hispidin (1:10-Verdünnung) und 5 µl NADPH (1:10-Verdünnung). Für Luz –

only control samples, 40 μ L of Luz protein extract was aliquoted per well and supplemented with 10 μ L of 3'-hydroxyhispidin (1:20 dilution). Luminescence was measured immediately using a Victor Nivo plate reader with a 530 nm emission filter and an integration time of 1,000 ms.

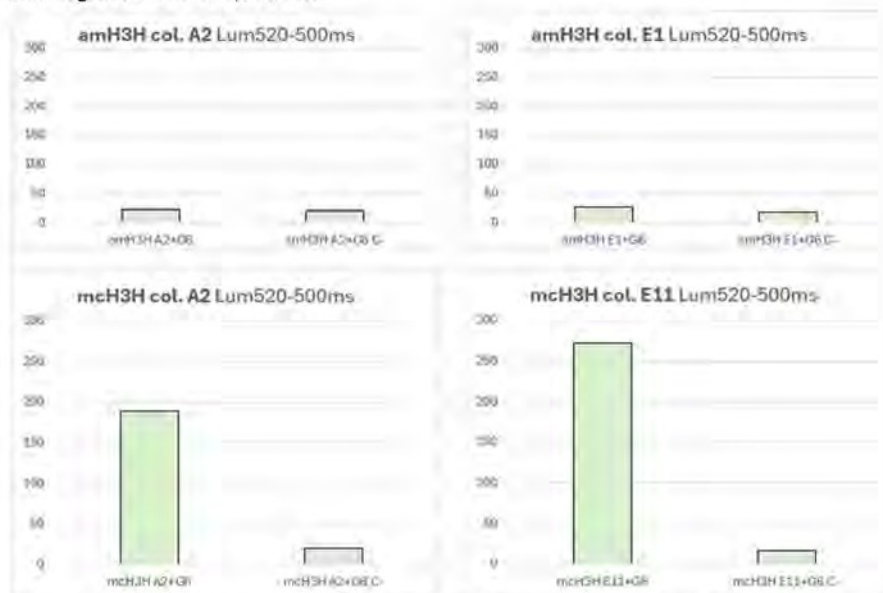


Figure 7. Luminescence activity of amH3H- and mch3H-expressing *Chlamydomonas* colonies (A2, E1, E11) in combination with Luz-expressing *Chlamydomonas*.

Luminescence measurements at 520 nm revealed marked differences in H3H-dependent Luz activity between the amH3H and mch3H constructs. In strains expressing amH3H (clones A2 and E1), luminescence signals were low and comparable to those observed in the corresponding negative controls lacking H3H activity, indicating minimal or no functional contribution of amH3H under the tested conditions.

In contrast, strains expressing mch3H exhibited substantially higher luminescence levels (Figure 7). The mch3H A2 clone showed a clear increase in Lum520 signal relative to its negative control, while the mch3H E11 clone displayed the strongest luminescence among all tested samples. In both cases, the negative control samples showed only background-level signals, confirming that the observed luminescence was dependent on functional H3H activity.

Overall, these results demonstrate that mch3H, but not amH3H, supports efficient production of the Luz substrate under the experimental conditions used, with notable variability in activity among independent mch3H transformants.

In addition, *Chlamydomonas* strains expressing HispS and CPH were generated in order to reconstitute a more complete luminescence pathway. Although luminescence

measurements were performed using these integrated components, no substantial light emission was detected under the tested conditions. This suggests that further optimization of expression levels, protein interactions, or reaction conditions may be required to achieve functional activity of the full pathway.

Despite these limitations, the identification of a functional mCH3H enzyme represents a critical step toward establishing a fungal bioluminescence system in *Chlamydomonas*. Based on this finding, we are currently preparing a manuscript that focuses on the successful expression and activity of mCH3H as a foundation for future pathway reconstruction.

In addition to testing the caffeic acid cycle derived from *N. nambi*, NanoLuc expression was also evaluated independently in *Chlamydomonas*. Cultures were grown from agar plates in 20 mL of TAP medium for 10 days. Cells were harvested by centrifugation at $1,000 \times g$ for 5 min, resuspended in 2.5 mL of fresh TAP medium, and transferred to 5 mL Falcon tubes. To induce luminescence, 2.5 mL of NanoGlo buffer–substrate mixture (98% buffer and 2% substrate) was added to each sample according to the manufacturer's instructions.

In this system, visible bioluminescence was clearly observed by the naked eye upon addition of the substrate, confirming functional NanoLuc activity in *Chlamydomonas* (**Figure 8**). Although the biochemical pathway responsible for the endogenous synthesis of the natural NanoLuc substrate has not yet been fully elucidated, these results suggest that this pathway could potentially be exploited for future bioluminescent applications.

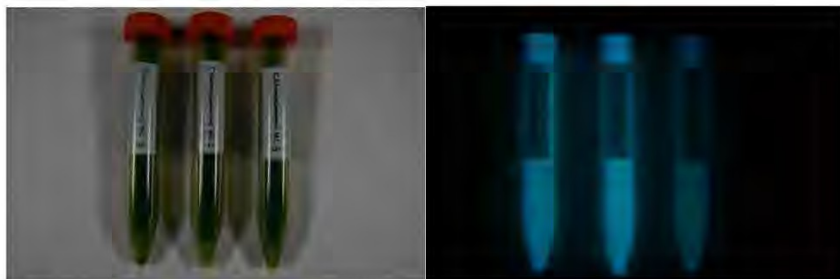


Figure 8. Substrate-Induced Visible Bioluminescence from NanoLuc-Expressing *Chlamydomonas*

Bioluminescent signals were recorded using a Nikon D7000 camera. Images under light conditions were acquired with an exposure time of 1/20 s and an aperture of f/13, while images under dark conditions were captured with an exposure time of 15 s and an aperture of f/4.5. The light-condition images were adjusted for brightness (+20), exposure (+20), and contrast (-20) and subsequently cropped. Dark-condition images were not modified and were only cropped for presentation.

Objective 2. Setup of a co-culture system

Task 2.1. Setup bioluminescent *E. coli*

To establish bioluminescent *E. coli*, we attempted to clone the luxCDABEG operon using modular cloning (MoClo) strategies. Currently, two major MoClo toolkits are available for use in *E. coli*: the CIDAR MoClo system (Iverson et al., 2016) and the EcoFlex toolkit (Lai et al., 2018).

A defining feature of any MoClo toolkit is its assembly syntax, which specifies the nucleotide sequences generated after digestion by type IIS restriction enzymes. This syntax dictates the order of part assembly, the overall design capacity of the system, and its compatibility with other Golden Gate–based cloning frameworks. The CIDAR MoClo system enables combinatorial assembly and provides an improved part library; however, its specific syntax limits assemblies to a maximum of four transcriptional units (TUs). In addition, promoters and terminators must be cloned in four distinct syntaxes, which restricts flexibility for more complex genetic designs (Iverson et al., 2016).

In contrast, the EcoFlex toolkit extends assembly capacity to up to 20 TUs at level 3 and offers a broad collection of modular parts, including promoters, ribosome binding sites, and fluorescent proteins, making it well suited for gene circuit construction (Lai et al., 2018). Nevertheless, EcoFlex does not follow the CIDAR MoClo syntax, limiting compatibility between toolkits. Furthermore, level 0 assembly in EcoFlex relies on conventional restriction–ligation rather than Golden Gate cloning, necessitating additional domestication steps that are labor-intensive and may reduce sequence diversity available for cloning (Iverson et al., 2016; Lee et al., 2015).

To overcome these limitations, our group is developing a new modular cloning toolkit for *E. coli*, termed SynColi. This system fully adheres to the MoClo standard syntax, allowing direct use of existing backbone vectors for level 0 assembly (**Figure 9**). As a result, SynColi is compatible with the CIDAR toolkit while extending its assembly capacity and addressing its previously described constraints.

During cloning attempts using this modular system, we observed that several constructs, particularly those containing the iLuxAB operon, could not be successfully obtained. We hypothesized that uncontrolled overexpression of the iLuxAB operon imposes a substantial metabolic burden on host cells, thereby reducing cell viability. Because the original MoClo backbone vectors lack a *lacI* repressor, expression from inducible promoters cannot be effectively regulated during cloning.

The absence of *lacI*-mediated repression may therefore explain the failure to recover correct iLuxAB-containing plasmids, as cells harboring fully assembled constructs may not survive long enough to form colonies following transformation. To test this hypothesis and enable successful cloning of iLuxAB, we proposed the construction of a new backbone vector incorporating a *lacI* transcriptional unit, thereby allowing tighter control of operon expression during cloning and propagation.

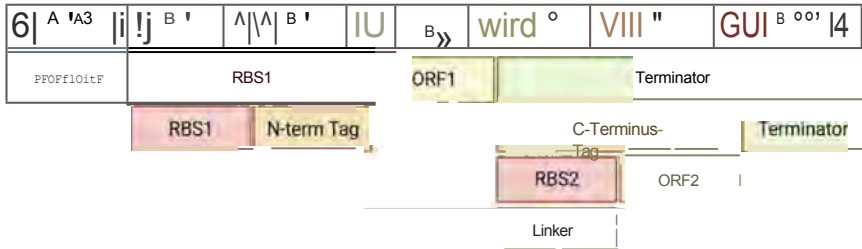


Abbildung 9. SynColi-Syntax und Assemblierungsfunktionen bei der Assemblierung der Stufe 1. Es können einfache Transkriptionseinheiten (TUs) assembliert werden, die einen Promotor, eine RBS, ein einzelnes ORF und einen Terminator enthalten. Es ist jedoch auch möglich, ein N-terminales oder ein C-terminales Tag hinzuzufügen oder Proteinfusionen zwischen zwei ORFs unter Verwendung einer Linkersequenz durchzuführen. Darüber hinaus können auch kleine Operons (mit zwei RBS-Stellen und zwei ORFs) assembliert werden. Abkürzungen: RBS: Ribosomenbindungsstelle, ORF: Offener Leserahmen, N-terminales Tag: N-terminales Tag und C-terminales Tag: C-terminales Tag.

Darüber hinaus unterstützt SynColi operonbasierte Designs. So entsprechen beispielsweise in der Abbildung A1–A3 der Promotorbereich, während das Modul B1–B2 die erste Ribosomenbindungsstelle (RBS1) enthält, gegebenenfalls zusammen mit einem N-terminalen Tag. Das Modul B4–B5 kann entweder C-terminale Tags enthalten und als zweite Ribosomenbindungsstelle (RBS2) sowie als zweites offenes Lesegerüst (ORF2) dienen. Das Kit ermöglicht zudem die Hinzufügung sowohl von N-terminalen als auch von C-terminalen Tags und enthält einen neu entwickelten lviO-Backbone-Vektor zur Klonierung von Terminator-Teilen in der Position B4–C1 (**Abbildung 9**). Darüber hinaus wird erwartet, dass das Kit die Backbone-Vektoren lvi1 und lvi2 enthält, die ein lac-Operon für die kontrollierte Proteinexpression tragen. Die erfolgreiche Erzeugung des ersten dieser Backbone-Vektoren wird in dieser Arbeit beschrieben.

Das SynColi-Kit wurde weiterentwickelt und dazu verwendet, verschiedene Konstruktionen zusammensetzen, die die iLuxAB-Gene sowie die YFP- und cpYFP-Proteine enthielten, um deren Biolumineszenzleistung zu testen.

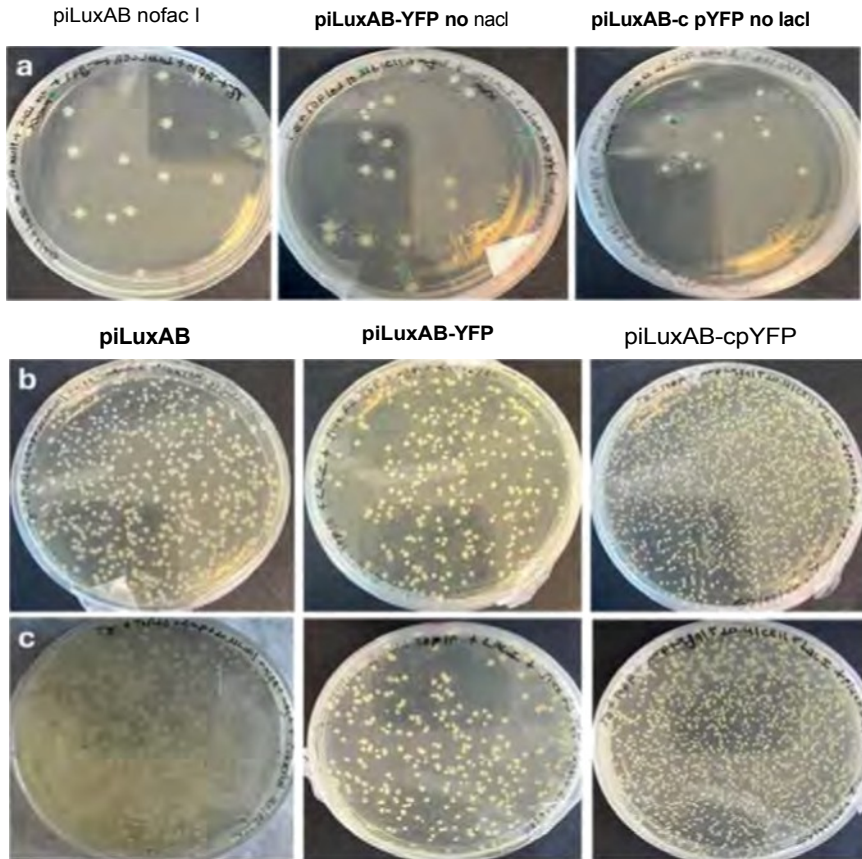


Abbildung 10. Vergleich der drei verschiedenen iLuxAB-Konstrukte, die unter Verwendung des piCH47751-Backbone-Vektors mit und ohne lacl assembliert wurden (a) Transformationsplatten der lacl-freien Konstrukte nach O/N-Inkubation (b) Transformationsplatten mit den Transformationsergebnissen der lacl-haltigen Konstrukte nach O/N-Inkubation (c) Transformationsplatten mit den Transformationsergebnissen der lacl-haltigen Konstrukte nach weiteren 48 Stunden bei 4 °C.

Um tatsächlich zu bestätigen, dass das Fehlen der lacl-Repression zu Toxizitätsproblemen führt, die sich darin äußern, dass nur jene Kolonien überleben, die fehlerhafte Assemblierungsprodukte enthalten, verglichen wir die Ergebnisse der Klonierung unter Verwendung von lacl-haltigen bzw. lacl-freien Backbone-Vektoren. Obwohl die Transformationsplatten der lacl-freien Konstrukte insgesamt weniger Kolonien ergaben, wurden dennoch einige weiße Kolonien beobachtet. Um festzustellen, ob diese Kolonien korrekt assemblierte Konstrukte enthielten oder nicht, führten wir einen diagnostischen Restriktionsschnitt durch. Drei Kolonien von jedem Konstrukt, das unter Verwendung des lacl-haltigen Backbone-Vektors assembliert wurde (piLuxAB, piLuxAB-YFP und piLuxAB-cpYFP), sowie drei Kolonien von

Die gleichen Konstrukte, die unter Verwendung des lac-Tacking-Backbones assembliert wurden (piLuxAB-nalacI, piLuxAB-YFP_noIacI und piLuxAB-YFP_noIacT), wurden entnommen, minimal aufbereitet und mit BbsI verdaut. Es wurde erwartet, dass die Verdauung mit diesem Enzym zwei Banden ergeben würde: eine, die dem Backbone entspricht, und eine, die dem Insert entspricht. Die Ergebnisse waren eindeutig und eindeutig. Alle 9 lacI-haltigen Konstrukte zeigten das erwartete Restriktionsmuster, was den erfolgreichen und korrekten Zusammenbau bestätigte. Im Gegensatz dazu ergaben alle 9 lacI-freien Konstrukte unerwartete Bandenmuster, was mit einem fehlerhaften Zusammenbau oder einer inaktiven Neuordnung übereinstimmt (Abbildung 11).

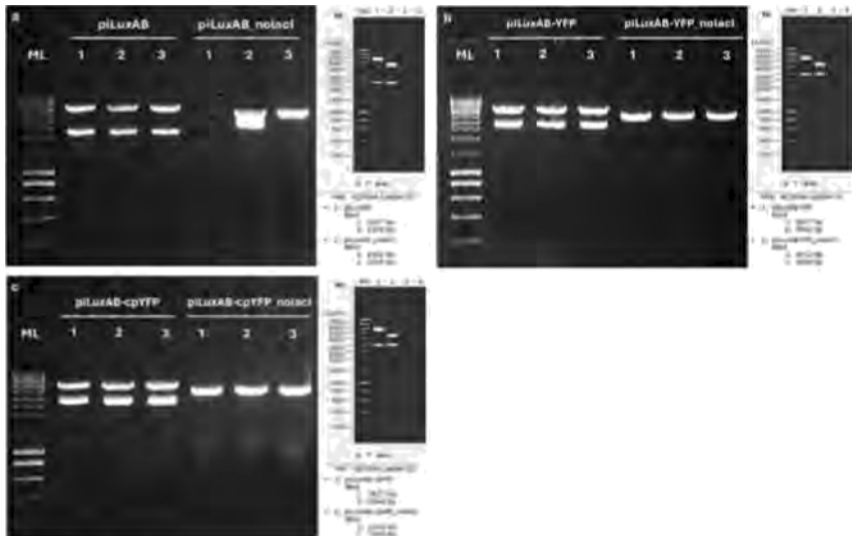


Abbildung 11, Restriktionsverdau-Analyse von Konstrukten, die mit und ohne lacI im Grundgerüst assembliert wurden. (a) Verdauungsgel von iLuxAB-Konstrukten, die mit (lacI) und ohne (kein lacI) Repressor-Grundgerüst assembliert wurden. (b) Verdauungsgel von iLuxAB-YFP-Konstrukten, die mit und ohne lacI assembliert wurden. (c) Verdauungsgel von iLuxAB-cpYFP-Konstrukten, die mit und ohne lacI assembliert wurden. Alle Plasmide wurden mit BbsI verdaut, und die Restriktionsmuster wurden mit den anhand von SnapGene-Simulationen vorhergesagten Fragmentgrößen verglichen.

Nachdem die verschiedenen Assemblierungen validiert und die Rolle des Repressors bestätigt worden war, konzentrierten wir uns als Nächstes auf das zweite Ziel dieses Projekts: die Messung und den Vergleich der Biolumineszenzleistung der verschiedenen Konstrukte. Konzentrierte Flüssigkulturen jedes der bestätigten piLuxAB-, piLuxAB-YFP- und piLuxAB-cpYFP-Transformanten wurden nach IPTG-Induktion und Zugabe von Deoxynukleotid unter Dunkel- und Lichtbedingungen abgebildet. Bei Umgebungslicht wurden keine sichtbaren Unterschiede zwischen den verschiedenen Transformantenstämmen und dem WT beobachtet (Abbildung 1za). Im Dunkeln war die Biolumineszenz jedoch in allen drei Transformantenstämmen deutlich nachweisbar. Sowohl das als positive Kontrolle verwendete pGEX-iLux-Konstrukt als auch piLuxAB zeigten eine starke Gel-Emission, was die Funktionalität des iLux-Systems unter den getesteten Bedingungen bestätigte. Umgekehrt zeigten sowohl die piLuxAB-YFP- als auch die piLuxAB-cpYFP-Kulturen ein vergleichsweise schwächeres Signal. Schließlich zeigte der nicht transformierte Top10-Stamm, der als

Die Negativkontrolle zeigte keine sichtbare Lichtemission (Abbildung 12b).

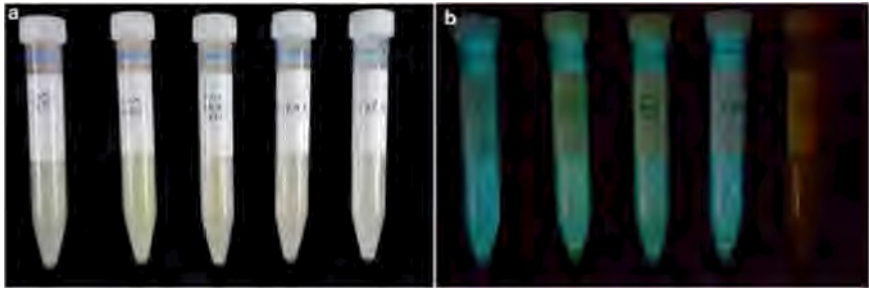


Abbildung 12. Visualisierung der verschiedenen biolumineszenten Stämme. (a) Kulturen unter weißem Licht, die keine Unterschiede im Erscheinungsbild zeigen. (b) Kulturen unter Dunkelbedingungen nach Induktion und Zugabe von Decanal, die eine sichtbare Lichtemission zeigen, was eine funktionelle Biolumineszenz bei allen drei Konstrukten bestätigt. Abkürzungen: iLuxAB: piLuxAB, iLuxAB-YFP: piLuxAB-YFP, iLuxAB-cpYFP: piLuxAB-cpYFP, pGEX (C+): pGEX-iLux als Positivkontrolle für die Lumineszenz und Top10 (C-) – untransformierte Top10-Zellen als Negativkontrolle für die Lumineszenz.

Im Anschluss an die Bildgebung wurden die Biolumineszenzwerte der Kulturen in dreifacher Ausfertigung quantifiziert; piLuxAB zeigte durchweg die höchste Lumineszenz (sogar höher als das zuvor veröffentlichte pGEX-iLux), was mit der direkt beobachteten Lumineszenzleistung übereinstimmt. Trotz der Fluoreszenz-Proteinfusion mit iLuxB zeigten die piLuxAB-YFP- und piLuxAB-cpYFP-Fusionskonstrukte (YFP und cpYFP) eine geringere Lumineszenz, was auf eine suboptimale Proteinbindung oder ineffizientes BRET hindeutet (Abbildung 13).

ko rri A 9 O-S OO rrsi

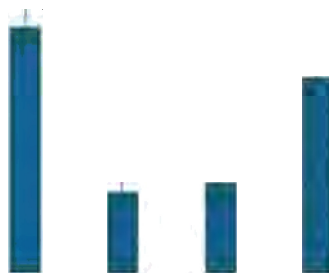


Abbildung 13. Quantifizierung der Lichtemission der verschiedenen iLuxAB-Konstrukte. Die Lumineszenz wurde mit einem Victor-Plattenlesegerät quantifiziert. Das Balkendiagramm zeigt die rohen Lumineszenzwerte nach Zugabe von Decanal, wobei piLuxAB das stärkste Signal aufweist.

Darüber hinaus wurde eine Analyse der Emissionsspektren durchgeführt, um ein potenzielles BRET-Phänomen zu bewerten, das aus der Fusion von iLuxB mit fluoreszierenden Proteinen resultiert. Frühere Studien haben gezeigt, dass eine direkte Fusion mit fluoreszierenden Proteinen wie Venus ar cpYFP aufgrund eines effizienten Energietransfers eine charakteristische Rotverschiebung der Emission hervorruft, typischerweise bei etwa 528 nm (Kaku et al., 2021). Dementsprechend erwarteten wir, dass unsere piLuxAB-YFP- und piLuxAB-cpYFP-Konstrukte im Vergleich zu unfusioniertem iLuxAB ein röteres Emissionsspektrum aufweisen würden. Das Spektrum des nicht fusionierten piLuxAB wies einen klaren und starken Peak auf, der bei 490 nm zentriert war, was mit dem erwarteten Emissionsprofil übereinstimmte (**Abbildung 14a**). Im Gegensatz dazu zeigten beide Fusionskonstrukte (piLuxAB-YFP und piLuxAB-cpYFP) nahezu identische Emissionskurven ohne nachweisbare Rotverschiebung. Trotz des Vorhandenseins von Fluoreszenzprotein-Fusionen blieb der beobachtete Peak bei 490 nm, was auf einen Mangel an effektiver Energieübertragung hindeutet und nahelegt, dass unter diesen Bedingungen kein BRET erreicht wurde (Abbildung 14b-c).

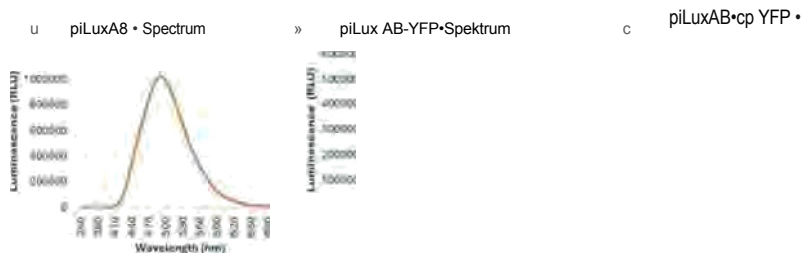


Abb. 14. Emissionsspektren biolumineszenter Konstrukte. (a) Das Emissionsspektrum von piLuxAB zeigte einen starken Peak bei 490 nm, was mit der erwarteten Emission übereinstimmt. (b) Das Emissionsspektrum von piLuxAB-YFP zeigte keine Rotverschiebung und einen deutlichen Peak bei 490 nm. (c) Das Emissionsspektrum von piLuxAB-cpYFP zeigte ebenfalls keine Rotverschiebung und einen deutlichen Peak bei 490 nm

Um festzustellen, ob die bei den piLuxAB-YFP- und piLuxAB-cpYFP-Fusionskonstrukten beobachtete verminderte Leuchtkraft und das Ausbleiben einer Spektralverschiebung auf eine kurze, aus einer Klonierungsnarbe stammende 6-Nukleotid-Spacer-Sequenz zwischen den iLux-B- und den Fluoreszenzprotein-Kodierungsbereichen zurückzuführen waren, wurde eine nahtlose Version jedes Konstrukts hergestellt. Dieser Ansatz stellte sicher, dass iLux B direkt mit entweder YFP oder cpYFP fusioniert wurde, ohne Sequenzen, die den Abstand zwischen den beiden fusionierten Proteinen beeinflussen und BRET beeinträchtigen könnten. Die resultierenden narbenlosen (sl) Konstrukte wurden pCM0_iLuxAB-YFPsl und pCM0_iLuxAB-cpYFPsl genannt. Nach der Transformation wurde eine Kolonie zur Sanger-Sequenzierung geschickt. Die Sequenzierung bestätigte die korrekte Ligation und die Entfernung der Narbensequenz in pCM0_iLuxAB-YFPsl und pCM0_iLuxAB-cpYFPsl.

Um den Einfluss der Narbenentfernung auf die BRET-Effizienz und die Biolumineszenzleistung zu bewerten, wurden Bildgebungsverfahren und Messungen des Biolumineszenzsignals durchgeführt. Die narbenfreien Konstrukte wurden zudem mit piLuxAB verglichen. Die visuelle Begutachtung unter weißem Licht ergab keinen Unterschied im Erscheinungsbild zwischen dem Konstrukt und der nicht transformierten Top10-Kontrolle

(Abbildung 15a). Im Dunkeln war die Lumineszenz in allen Konstrukten deutlich sichtbar, jedoch wurde bei den nahtlosen Versionen kein wahrnehmbarer Anstieg der Helligkeit beobachtet (Abbildung 15b).

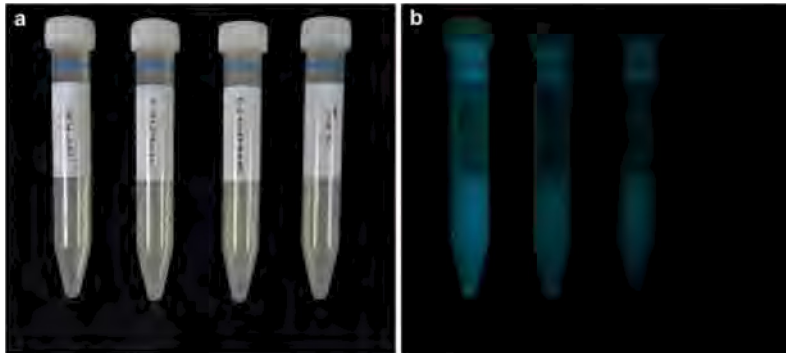


Abbildung 15. **Visualisierung** der verschiedenen **biolumineszenten Stämme**. (a) Kulturen unter weißem Licht, die keine Unterschiede im Erscheinungsbild zeigen. (b) Kulturen unter Dunkelbedingungen nach Zugabe von Decanal, die eine sichtbare Lichtemission zeigen und die funktionelle Biolumineszenz aller drei Konstrukte bestätigen. Abkürzungen: iLuxAB: piLuxAB, iLuxA BYFP' piLuxAB-YFPsi, iLuxAB-cpYFP: piLuxAB-cpYFPsi, verwendet als Positivkontrolle für die Lumineszenz, und Top10: untransformierte Top10-Zellen, verwendet als Negativkontrolle für die Lumineszenz



Abbildung 16. Quantifizierung und Emissionsspektren der nahtlosen Konstrukte. (a) Diagramm mit den rohen Lumineszenzwerten, wobei piLuxAB das stärkste Signal aufweist. (b) Auf OD normalisierte Lumineszenzwerte, die bestätigen, dass die beobachteten Signalunterschiede nicht auf Schwankungen der Zelldichte zurückzuführen sind.

Die Emissionsspektren wurden für piLuxAB sowie die nahtlosen Konstrukte piLuxAB-YFPsi und piLuxAB-cpYFPsi unter Verwendung des SpectraMax M3-Lesegeräts erfasst. Das piLuxAB-Konstrukt zeigte einen einzigen Emissionspeak bei 490 nm, was mit früheren Beobachtungen übereinstimmt (Abbildung 15). Die nahtlosen piLuxAB-YFPsi- und piLuxAB-cpYFPsi-Konstrukte zeigten ebenfalls

the same emission peak with no detectable red-shift, which would have indicated energy transfer to the fluorescent proteins (**Figure 17**). This result suggests that even when iLuxB was directly fused to the fluorescent domains, the BRET effect remained inexistant.

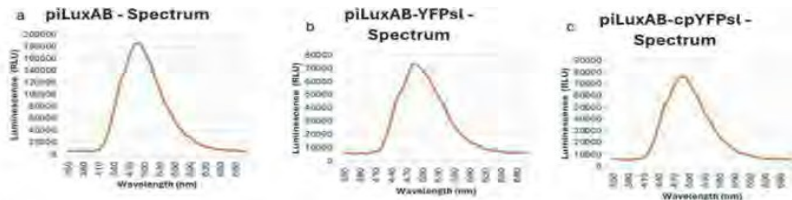


Figure 17. Emission spectra of bioluminescent constructs. (a) piLuxAB displayed a strong emission peak at ~490 nm, consistent with its expected native output. (b) piLuxAB-YFP and. (c) piLuxAB-cpYFPst showed no redshift in emission compared to piLuxAB, suggesting inefficient energy transfer.

In this study, we aimed to establish a robust strategy for generating bioluminescent *E. coli* by cloning and expressing the luxCDABEG operon using modular cloning (MoClo) approaches. Existing MoClo toolkits for *E. coli*, including CIDAR MoClo and EcoFlex, each offer distinct advantages but also present limitations in terms of assembly capacity, syntax compatibility, and cloning flexibility. To address these constraints, we developed a new MoClo-compatible toolkit, SynColi, which adheres to the MoClo standard syntax, ensures compatibility with CIDAR parts, and expands design flexibility for operon-based constructs. During cloning attempts, we identified a critical limitation in existing MoClo backbones: the absence of lacI-mediated repression. Constructs containing the iLuxAB operon could not be reliably obtained, likely due to uncontrolled operon expression imposing a strong metabolic burden on host cells and reducing viability. By introducing a lacI transcriptional unit into the backbone vector, we successfully restored cloning efficiency, demonstrating that repression during cloning is essential for handling energetically demanding bioluminescent pathways.

Using the lacI-containing SynColi backbones, multiple iLuxAB-based constructs were successfully assembled and validated, including unfused iLuxAB and iLuxAB fusions with YFP and cpYFP. Functional assays confirmed that all validated constructs produced detectable bioluminescence following induction and substrate addition, with unfused iLuxAB consistently yielding the strongest signal. Fusion constructs exhibited reduced luminescence output, suggesting compromised enzyme performance or suboptimal energy transfer.

Emission spectrum analyses further revealed that neither YFP nor cpYFP fusion constructs exhibited the expected red-shift associated with bioluminescence resonance energy transfer (BRET). Removal of the cloning scar between iLuxB and the fluorescent proteins did not improve luminescence intensity or induce spectral shifts, indicating that direct fusion alone was insufficient to achieve efficient BRET under the tested conditions.

This work establishes SynColi as a flexible and reliable modular cloning framework for bioluminescent pathway engineering in *E. coli*. It highlights the critical importance of transcriptional regulation during cloning of metabolically burdensome systems and provides a validated platform for future optimization of bacterial bioluminescence and BRET-based sensor designs.

Furthermore, our research revealed that while the well-known H3H from *N. nambii* remains inactive in *Chlamydomonas*, the distantly related mcH3H is functional. This discovery provides critical insights for the future engineering of functional bioluminescent microalgae.

Auf dem Weg zu
einer
biolumineszenten
Zukunft

Alberto T. Estévez

Hintergrund

In diesem Leben verflochten sich Ereignisse nach und nach, bahnen uns einen Weg, während wir voranschreiten, der Nebel der Zeit lichtet sich und führt zu einem unbekanntem Ende, wodurch die Geschichte der Dinge Gestalt annimmt, wenn wir zurückblicken. Und so verhielt es sich auch mit dem, was wir hier und jetzt vor uns haben: bahnbrechende Forschung zur Anwendung von Biolumineszenz in unseren Häusern und Städten.

Mehr als 30 Jahre sind seit jenem Dezember 1995 vergangen, als der Verfasser dieser Zeilen der damals noch nicht gegründeten Universität Internacional de Catalunya (UIC) einen Vorschlag unterbreitete, den man dort noch nicht in Betracht gezogen hatte: die Gründung einer Architekturfakultät, der ESARQ, innerhalb ihrer Mauern. Tatsächlich hatte er bereits seit August 1978 darüber nachgedacht, als er zum ersten Mal von der geplanten Gründung der UIC Barcelona hörte. Er wurde dann damit beauftragt, sie als ihr erster Direktor aufzubauen, und tat dies mit einer sehr klaren Vision: Er wollte, dass sie eine hochmoderne Fakultät von unbestrittenem internationalem Ansehen wird. Deshalb besetzte er sie mit den wegweisendsten Persönlichkeiten der lokalen, nationalen und internationalen Szene (nicht ohne Anstrengungen und nicht ohne auf Hindernisse zu stoßen). Dies führte zu einer raschen weltweiten Anerkennung. Durch dieses Engagement entdeckte er Persönlichkeiten, die über den ganzen Globus verstreut waren, lud sie zunächst zu Konferenzen, Vorträgen und Präsentationen ein und stellte sie später als Professoren für den Bachelor- und Masterstudiengang ein. Im Jahr 2000 arbeitete er sogar mit ihnen zusammen, um ein für seine Zeit systematisches, fortschrittliches und bahnbrechendes Programm zu schaffen: den heutigen Masterstudiengang in Biodigitaler Architektur. Diese Persönlichkeiten begannen ihre Vorträge nicht mit den unter Architekten üblichen Bezügen – der Welt der Moderne –, sondern mit Bezügen zur Natur. Einige integrierten sie auf unkonventionelle und nicht „naturschutzorientierte“ Weise in ihre Arbeit, während andere sie mithilfe digitaler Werkzeuge erforschten: Bernard Cache, Karl S. Chu, Marcos Cruz, Dennis L. Dollens, Evan Douglass, Mark Goulthorpe, Greg Lynn, Marcos Novak, Kas Oosterhuis, François Roche, Lars Spuybroek und andere.

So war die Hinwendung zur Biologie in der Architektur bereits vorhergesagt worden. Unterdessen kam es im Dezember 1999 zu einer regelrechten „Explosion“ in den Medien hinsichtlich der spektakulären Fortschritte in der Genetik. Angesichts der Tatsache, dass die Genetik zunehmend auf zwei lebenswichtige menschliche Bedürfnisse – Gesundheit und Ernährung – angewendet wurde, nicht jedoch auf solche, die den Lebensraum betreffen (Wohnen, Licht und Wärme), beschloss der Unterzeichner als Architekt, die Genetik auf die Architektur anzuwenden, und gründete im Januar 2000 an der ESARQ-UIC

Barcelona, das auch einen Master- und einen Doktorandenstudiengang ins Leben rief. Damit gründete er das weltweit erste echte genetische Labor, das sich architektonischen Zielen widmet, und arbeitete zum ersten Mal in der Geschichte der Architektur mit Genetikern zusammen. 2003 initiierte er das Projekt „Genetic Barcelona“, das mit diesem Buch seine sechste Phase (2023–2026) abschließt und sich auf die Anwendung von Biolumineszenz in unseren Räumen konzentriert.

Biolumineszenz und Architektur

Die Integration der Biolumineszenz – der Lichtemission durch lebende Organismen – als architektonische Ressource stellt einen Paradigmenwechsel von energieverbrauchenden Systemen hin zu einer biologisch eingebetteten Lichtproduktion dar, eine radikale Veränderung in der Konzeption von Energie, Materialität und Umwelt im Design. Traditionell stützte sich die Architektur auf externe Energiesysteme (Feuer, Elektrizität), doch die Biolumineszenz schlägt ein selbst erzeugtes, lebendiges Licht vor, das in den biologischen Systemen selbst eingebettet ist. Diese bahnbrechende Forschung wurde seit 2003 unter dem Namen „Genetic Barcelona Project“ an der ESARQ-UIC Barcelona entwickelt. Diese Arbeit ist eingebettet in die historische Entwicklung der Biolumineszenzforschung und den Aufstieg der Gentechnik, mit konzeptionellen, technischen und ökologischen Implikationen biolumineszenter Systeme in der Architektur.

Die Geschichte der Architektur ist eng mit der Steuerung und Erzeugung von Licht verflochten, von Feuer und Öllampen bis hin zur Elektrizität. Das Aufkommen der Biolumineszenz als architektonisches Medium signalisiert jedoch einen radikalen Wandel: Licht wird nicht mehr extern erzeugt, sondern biologisch innerhalb lebender Systeme produziert.

Seit 2003 erforscht das Genetic Barcelona Project diese Möglichkeit durch experimentelle Anwendungen von Gentechnik und Lebewesen in der Architektur. Das Projekt schlägt einen Wandel von industrieller Fertigung hin zu biologischem Wachstum vor und bringt die Architektur in Einklang mit den Prozessen des Lebens selbst: Die Wissenschaft hat die Fiktion überholt, und die Utopie von heute ist die Realität von morgen.

Biolumineszenz: Wissenschaftliche Ursprünge und architektonische Vorstellungskraft

Biolumineszenz – die Erzeugung und Abstrahlung von Licht durch lebende Organismen – wurde in marinen und terrestrischen Ökosystemen beobachtet.

Die Biolumineszenz fasziniert Wissenschaft und Kultur seit langem. Sie tritt bei Organismen wie Quallen, Glühwürmchen, Tiefseefischen, Würmern, Pilzen, Plankton, Bakterien usw. auf und wird seit dem 19. Jahrhundert erforscht; doch erst mit dem Aufkommen der Molekularbiologie und der Gentechnik im späten 20. Jahrhundert wurde es möglich, lumineszierende Eigenschaften zwischen verschiedenen Arten zu übertragen.

Die Entdeckung und Anwendung des Grünen Fluoreszenzproteins (GFP) – ursprünglich aus der Qualle *Aequorea victoria* isoliert – war ein entscheidender Wendepunkt. GFP wurde zu einem grundlegenden Werkzeug der Biotechnologie, das es Wissenschaftlern ermöglichte, genetische Prozesse sichtbar zu machen und schließlich die Übertragung von Lichtemissionsfähigkeiten auf Pflanzen und andere Organismen in Betracht zu ziehen. Seine biochemische Grundlage beruht typischerweise auf der Reaktion zwischen Luciferin und Luciferase, bei der Licht ohne Wärme entsteht. So markierte das späte 20. Jahrhundert mit der Isolierung des Grünen Fluoreszenzproteins (GFP) einen entscheidenden Wendepunkt, der den Transfer lumineszierender Eigenschaften zwischen verschiedenen Arten ermöglichte. Diese Entdeckung verwandelte die Biolumineszenz von einer natürlichen Kuriosität in eine programmierbare biologische Funktion.

Die Architektur durchlief unterdessen ihren eigenen Wandel. Die ökologische Wende des späten 20. Jahrhunderts führte in Verbindung mit Fortschritten in der Informatik zu neuen Paradigmen, die Nachhaltigkeit, Anpassungsfähigkeit und die Integration in natürliche Systeme in den Vordergrund stellten. In diesem Kontext lässt sich die Genetik als neue Grenze identifizieren. Die wahre Revolution ist nicht nur digital, sondern auch biologisch, mit der Möglichkeit, „Leben zu entwerfen“. So entsteht biolumineszente Architektur an der Schnittstelle von Biotechnologie und Designspekulation, aber auch als konkrete Forschungsagenda.

Das Genetic Barcelona Project: Forschungsphasen und Experimente

Phase I (2003–2006). Transgene Pflanzen, biolumineszente Bäume. Die Anfangsphase des Projekts konzentrierte sich auf die Einführung von GFP in Pflanzen, insbesondere in Zitrusarten: Das GFP-Gen wurde erfolgreich in die DNA von sieben Zitronenbäumen (Sorte „Fino“) integriert, die jahrzehntelang leben. Das Ziel war es, autonom leuchtende Vegetation zu erzeugen, die als städtische Beleuchtungssysteme fungieren kann. Das Ziel ist die genetische Erzeugung von Pflanzen mit natürlichen Lichtemissionsfähigkeiten für den städtischen und häuslichen Gebrauch. Diese Phase ist nicht nur wegen ihrer technischen Experimente von Bedeutung, sondern auch wegen ihrer konzeptionellen Neudefinition von Architektur. Licht wird nicht mehr installiert, sondern kultiviert, was das Design verändert

im Bereich der landwirtschaftlichen und biologischen Praktiken. (In Zusammenarbeit mit Leandro Peña, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, und Agustí Fontarnau, UIC Barcelona).

Phase II (2007–2010): Biolumineszente Systeme und Biolampen. In der zweiten Phase wurde der Einsatz biolumineszenter Bakterien ausgeweitet, was eine kontrolliertere und intensivere Lichterzeugung ermöglichte. Dies führte zur Entwicklung biolumineszenter Lampen (Biolampen), experimenteller Innenräume, die ohne Strom beleuchtet wurden, sowie von Prototypen für vollständig biolumineszente Wohnumgebungen. Zum ersten Mal wurde ein komplettes Haus durch Biolumineszenz beleuchtet, ohne Kabel oder herkömmliche Energiesysteme. Hier bewegt sich das Projekt von der biologischen Machbarkeitsstudie hin zur architektonischen Anwendung und demonstriert die Machbarkeit im Maßstab bewohnbarer Räume. (In Zusammenarbeit mit Agustí Fontarnau und Aránzazu Balfagón, UIC Barcelona. Gefördert vom spanischen Wissenschaftsministerium und dem Institut Català del Sòl, Generalitat de Catalunya).

Phase III (2011–2014): Hybridisierung und Designintegration. Die dritte Phase konzentrierte sich auf die Steigerung der Effizienz durch genetische Hybridisierung, wobei die für die Biolumineszenz verantwortlichen Bakteriengene in die DNA von Pflanzen eingebracht wurden. Die Bedeutung dieser Phase liegt darin, dass die Ergebnisse umso weniger veraltet und umso „ewiger“ sind, je näher die Prozesse an der Natur liegen. Diese Phase verbindet biologische Experimente mit architektonischem Design und schafft Systeme, die nicht nur funktional, sondern auch ästhetisch und ökologisch integriert sind. (In Zusammenarbeit mit Agustí Fontarnau und Aránzazu Balfagón, UIC Barcelona. Gefördert vom spanischen Wissenschaftsministerium und der Generalitat de Catalunya).

Phase IV (2015–2018): Biolumineszente Pilze. Arbeit am Wachstum von Pilzen, wobei die Arten mit der stärksten Biolumineszenz untersucht werden. (In Zusammenarbeit mit Enric Gràcia, Universität de Barcelona, und Agustí Fontarnau, UIC Barcelona).

Phase V (2019–2022): Biolumineszente Algen. Arbeit am Wachstum von Algen in biorezeptiven, digital entworfenen und 3D-gedruckten Paneelen. (In Zusammenarbeit mit Yomna K. Abdallah, UIC Barcelona).

Phase VI (2023–2026): Bakterien, Pilze, Algen und Pflanzen. Verbesserung der Biolumineszenz und Haltbarkeit bei Bakterien. Einführung von Genen, die

für die Biolumineszenz von Pilzen in Algen. Einführung von Genen, die für die bakterielle Biolumineszenz verantwortlich sind, in Zierpflanzen. (In Zusammenarbeit mit Yomna K. Abdallah, UIC Barcelona, Aránzazu Balfagón und Marta Serra, UIC Barcelona und XTART, sowie Jae-Seong Yang, CRAG. Gefördert durch die Fritz und Trude Fortmann Stiftung).

Phase VII (2027–2030): Ziele noch offen. Offen für neue Kooperationen, aber mit dem Ziel, endlich biolumineszente Zierpflanzen mit einer wirklich effektiven Biolumineszenz zu erhalten und biolumineszente Hefe zu züchten. (In Zusammenarbeit mit Yomna K. Abdallah, UIC Barcelona, Aránzazu Balfagón und Marta Serra, UIC Barcelona und XTART).

Biodigitale Architektur: Ein theoretischer Rahmen

Licht als lebendige Materie. Das „Genetic Barcelona Project“ ist in das umfassendere Konzept der biodigitalen Architektur eingebettet, einem Begriff, der entwickelt wurde, um die Verschmelzung von biologischen Systemen, digitalen Technologien und architektonischem Design zu beschreiben. Diese Konvergenz wurde in der Ausstellung „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture & Design“ (21.^{bis} 3. Januar 2026, UIC Barcelona) ausführlich demonstriert, insbesondere anhand der Biolampen, Biocontainer und bioreceptiven Paneele: eine Verschmelzung von Bits und Genen, bei der digitale und biologische Prozesse in Design und Produktion zusammenlaufen. Dieser Rahmen impliziert mehrere wesentliche Veränderungen:

Vom Bauen zum Wachsen: Gebäude werden nicht mehr zusammengebaut, sondern gezüchtet, wodurch sich die Architektur in Richtung Biofertigung verschiebt, in einer Hybridisierung und Koexistenz biologischer und digitaler Einheiten.

Von Materialien zu Organismen: Materialien werden zu lebenden Einheiten, die sich anpassen, reparieren und vermehren können.

Vom Energieverbrauch zum Stoffwechsel: Energiesysteme werden in biologische Prozesse integriert, wodurch der externe Verbrauch reduziert wird.

Abgesehen davon muss natürlich die technische Machbarkeit verbessert werden, und dies kann nur im Rahmen spezifischer Unternehmen geschehen, die an einer Massenproduktion interessiert sind. In Anbetracht dessen, dass die derzeitige künstliche nächtliche

Lichtverschmutzung in unseren Städten dazu führt, dass die vorgeschlagenen Prototypen im Freien nicht ausreichend nützlich oder wettbewerbsfähig sind und nur in dunklen Innenräumen von Nutzen sind.

Dabei sind auch ethische Überlegungen zur genetischen Veränderung von Organismen zu berücksichtigen, in diesem Fall zu architektonischen Zwecken. Denn jede Manipulation von Lebensformen, die damit verbundenen möglichen ökologischen Risiken sowie Fragen der Biosicherheit müssen sorgfältig abgewogen werden und erfordern Vorschriften sowie fundiertes Fachwissen. Niemand käme auf die Idee, auf einem U-Bahnsteig eine Herzoperation durchzuführen. Daher sollte in diesen Fällen natürlich dasselbe Verantwortungsbewusstsein gelten, das jeder professionelle Wissenschaftler besitzt. Es geht nicht um eine Laune oder Neugier, sondern um ökologische Nachhaltigkeit.

Wie dem auch sei, was hier vorgeschlagen wird, hat auch ästhetische und kulturelle Implikationen. Biolumineszente Architektur stellt die traditionelle Ästhetik in Frage. Sie führt dynamische, lebendige Umgebungen, nicht standardisierte Formen und zeitliche Variabilität ein. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft das ökologische Potenzial im Vergleich zur technologischen Abhängigkeit. Biodigitale Systeme sind auf fortschrittliche biotechnologische Infrastrukturen angewiesen, jedoch nur das erste Exemplar. Wie Feuer, das man, sobald es entfacht ist, kostenlos an jeden weitergeben kann. Oder Pflanzen, von denen man, sobald man ein Exemplar hat, Stecklinge verschenken kann. All dies ist recycelbar und erneuerbar, wie die Natur selbst: von ihr lernen, in einem Prozess des Bio-Lernens. Nicht nur von ihren Formen, sondern von ihren Systemen.

Auf dem Weg zu einer integralen Ökologie

All diese Arbeiten müssen im Rahmen einer integralen Ökologie verstanden und begründet werden, in der ökologische, soziale, technologische und kulturelle Dimensionen vereint sind. Die Zukunft der Architektur liegt darin, von der Natur zu lernen, und die biolumineszente Architektur verkörpert dieses Prinzip, indem sie den Energieverbrauch senkt, sich in Ökosysteme integriert und die Beziehung zwischen Mensch und gebauter Umwelt neu überdenkt. Ihr Erfolg hängt jedoch davon ab, dass die Natur auf zeitgemäße und offene Weise betrachtet wird, so wie sie wirklich ist, ohne vom Menschen auferlegte Vorurteile.

Auf jeden Fall stellt das Genetic Barcelona Project den ersten und nachhaltigsten Versuch in der Geschichte dar, Biolumineszenz in die architektonische Praxis zu integrieren. Durch die Kombination von Gentechnik und Design schlägt es ein neues Paradigma vor, in dem Architektur zu einer Form eines lebenden, metabolischen Systems wird.

Durch die Verschmelzung von Genetik, Ökologie und Design könnte eine Zukunft entstehen, in der Städte organisch leuchten, Energie im Leben selbst verankert ist und Architektur Teil der Stoffwechselprozesse der Natur wird. Le Corbusiers Idee der „strahlenden Stadt“ („Ville Radieuse“) aus dem 20. Jahrhundert verwandelt sich im 21. Jahrhundert in die „leuchtende Stadt“: eine neue, lebendige und nachhaltige Architektur. (Abbildungen 1–5).



Abbildung 1–2. „Die leuchtende Stadt“. Verschiedene Biolampen-Entwürfe in der Ausstellung „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture and Design“, UIC Barcelona, 21. Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Wahrnehmung des menschlichen Auges). Von den Autoren.

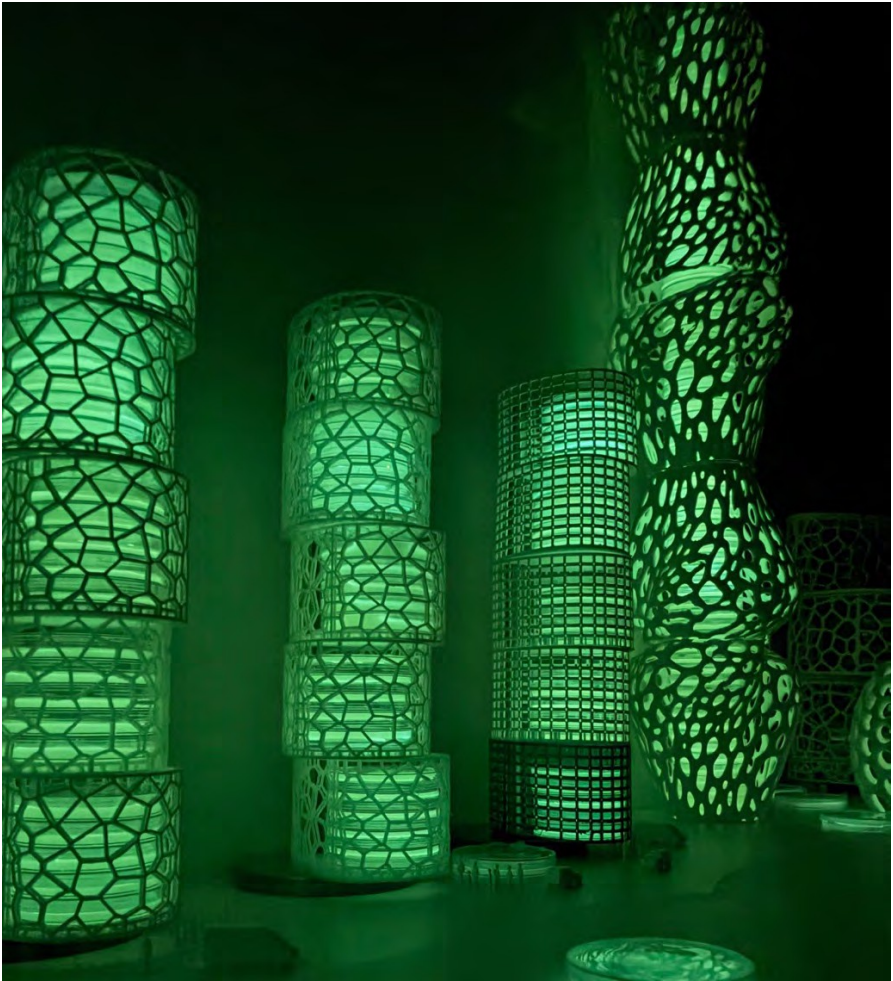
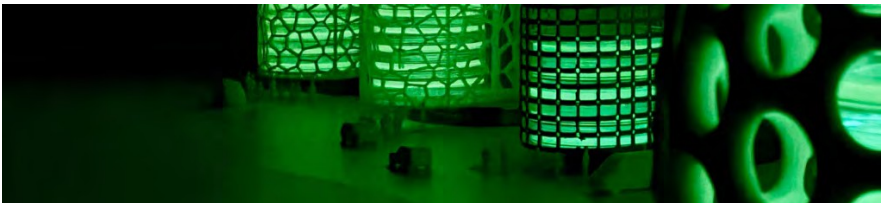


Abbildung 3-4. „Die leuchtende Stadt“. Verschiedene Biolampen-Entwürfe (inspiriert vom Gebäude der Fortmann-Stiftung in Bochum) und eine ganze Biokolonne in der Ausstellung „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture and Design“, UIC Barcelona, 21. Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Wahrnehmung des menschlichen Auges). Von den Autoren.



Kurz gesagt: Die gesamte Arbeit, die in den letzten Jahren zum Thema Biolumineszenz geleistet wurde – deren Relevanz offensichtlich ist –, hat die Debatte über biodigitale Architektur maßgeblich beeinflusst und neue Forschungshorizonte eröffnet. Ihre tatsächliche Umsetzung hängt nun allein vom Mut derjenigen ab, die über die finanziellen Mittel dazu verfügen, wie es die Fritz-und-Trude-Fortmann-Stiftung in diesem Fall mit ihrer Großzügigkeit und Aufgeschlossenheit unter Beweis gestellt hat. Natürlich ist noch nicht sicher, ob biolumineszente Städte zur weit verbreiteten Realität werden, aber der konzeptionelle Wandel, den sie darstellen, verändert bereits das architektonische Denken. Ein wahres Manifest, um den Menschen die Augen für die neuen Realitäten zu öffnen, die wir in unserer Zeit schaffen müssen: Städte werden zu 50 % biologisch und zu 50 % digital sein, oder sie werden nicht existieren.

Alberto T. Estévez



Abbildung 5. „The Glowing City“. Entwürfe von Biolamps, Biokolonne und bioreceptive Paneele in der Ausstellung „Towards a Bioluminescent Future: Art, Architecture and Design“, UIC Barcelona, 21. Januar 2026 (Foto: Alberto T. Estévez, Apple iPhone 16e, ISO 2500–5000, f 1,64, 3,4 Sek., entspricht der natürlichen Sicht des menschlichen Auges). Von den Autoren.

