

LOEWE

ABSCHLUSSBERICHT



LOEWE-Schwerpunkt DynaMem
Dynamik von Membranen: Molekulare Grundlagen und Theoretische Beschreibung

Inhalt

- 2 Statement des Koordinators
- 3 Projektinhalte
- 3 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
- 3 Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen
- 5 Erreichte Strukturentwicklung
- 6 Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld
- 7 Wichtigste Meilensteine des Projekts
- 8 Weitere Informationsmöglichkeiten
- 9 Zahlen und Fakten
- 10 Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute
- 12 Impressum

In der Natur sind Membranen als räumliche Grenze, aber auch als Reaktionsplattform biologischer und chemischer Prozesse von grundlegender Bedeutung. Membranen ermöglichen eine räumliche und zeitliche Kontrolle zellulärer Vorgänge. Deshalb sind biologische Membranen als essenzielle zelluläre Komponenten eine Grundvoraussetzung der Bildung zellulär organisierter Organismen. In der Vielzahl von unseren Publikationen wurde gezeigt, dass Membranstrukturen überraschend heterogen aufgebaut sind und eine außergewöhnlich hohe Dynamik aufweisen, sei es durch den Fluss der Membranzymoleküle, der Anordnung in Form und Ort als auch die Bildung von membranumschlossenen Reaktionsräumen, wie auch anderen Effekten. Der Fokus des LOEWE DynaMem-Konsortiums während der letzten 4,5 Jahre lag auf dem fundamentalen Verständnis der biochemischen und molekularen Grundlagen von Membranen. Dabei sind bis jetzt insgesamt 90 Publikationen und ein Patent entstanden. 27 Publikationen sind in Zeitschriften mit Impact Factor größer zehn und vier Publikationen in Zeitschriften mit Impact Factor 30 und höher erschienen. Zusätzlich sind ein DFG-Sonderforschungsbereich und ein DFG-Graduiertenkolleg eingeworben worden und damit die Nachhaltigkeit der Forschung der Membrandynamik an der Goethe-Universität gewährleistet worden.

Prof. Dr. Achilleas Frangakis
Koordinator des LOEWE-Schwerpunkts DynaMem
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Projekthalte

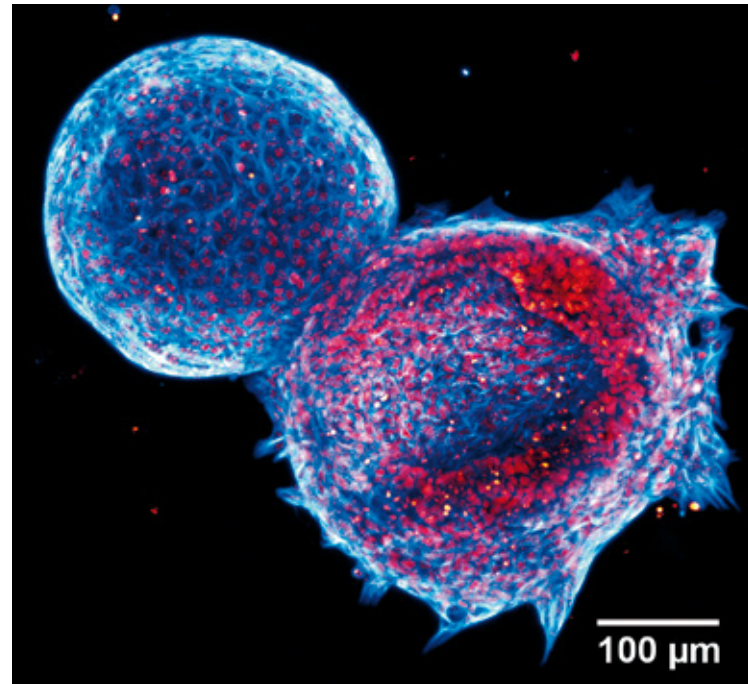
Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

Der wissenschaftliche Fokus des LOEWE Schwerpunkts DynaMem war die Analyse und Aufklärung in den Themenbereichen:

- Manipulation der Membranfunktion,
- Zelluläre Modellierung der Membrandynamik und
- Dynamik von Membransystemen und Organellen, wobei jeder Themenbereich die Membranen sowohl als räumliche Grenze, aber auch als Reaktionsplattform biologischer und chemischer Vorgänge betrachtete. Auf Ebene der Organellen waren in DynaMem Mitochondrien ein zentrales subzelluläres Analyseobjekt. Jedoch wurden auch Analysen auf Zell- und Gewebeebene durchgeführt, sowie auch die Nanostruktur der Membranen (in drei Größenordnungen) in Form von unterschiedlichen Lipiden, lipophilen Stoffen, integralen Membranproteinen und Membranassoziierten Komplexen untersucht. Somit wurden im LOEWE-Schwerpunkt räumliche Dimensionen von etwa vier bis fünf Größenordnungen abgedeckt und Zeitabschnitte von Mikrosekunden bis zu Stunden betrachtet.

Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen

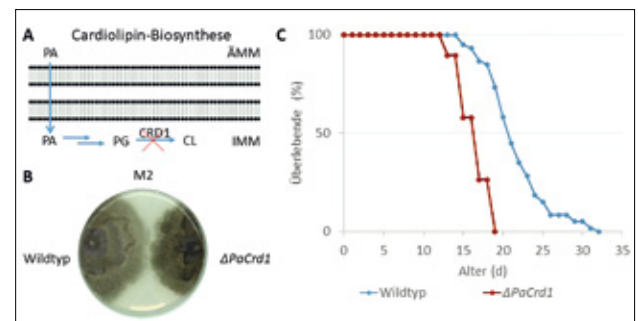
In der Vielzahl von unseren Publikationen wurde gezeigt, dass Membranstrukturen überraschend heterogen aufgebaut sind und eine außergewöhnlich hohe Dynamik aufweisen, sei es durch den Fluss der Membranmoleküle, die Anordnung in Form und Ort als auch die Bildung von membranumschlossenen Reaktionsräumen, wie auch anderen Effekten. In DynaMem wurde u. a. die Membranfunktion untersucht und verändert, indem verschiedene Peptide, darunter Naturstoffe aus krankheitserregenden Bakterien, mit Biomembranen zum Interagieren gebracht wurden. Dabei zeigte sich, dass das Molekül CLiB (CardioLipin-Binder) die Struktur der Membran beeinflusst und die Atmung des Bakteriums *E. coli* beeinträchtigt. Ein anderes mitochondriales Molekül, die Fettsäuresynthetase (FAS), wurde als Tool umprogrammiert, um Fettsäuren unterschiedlicher Ketten-



Organoid bestehend aus Pankreaskanalzellen aus der Maus, die sich in zwei verschiedene Zelltypen entwickeln kann (bi-potent). Membranen in blau und grün dargestellt. rot = Zellkerne, cyan = F-Aktin.

länge herzustellen, um so zellbiologische Prozesse zu analysieren. Diese Fettsäuren sind als wichtige Plattformchemikalien in der chemischen Industrie und Biotechnologie interessant. Einige dieser Naturstoffe eignen sich potenziell als Insektizide.

Einschränkungen der Funktionen der Mitochondrien sind maßgeblich an verschiedenen Krankheiten, wie der Alzheimer und Parkinson, aber auch an Alterungsprozessen beteiligt. Die Funktionen von Mitochondrien hängen dabei entscheidend von ihrer Struktur ab. In computergestützten Analysen wurden Substanzen identifiziert, die spezifisch mit Cardiolipin



Deletion der Cardiolipin-Synthase: (A) Schematische Abbildung der Cardiolipin-Biosynthese. Der Deletionsstamm der Cardiolipin-Synthase (rotes Kreuz) kann kein Cardiolipin mehr bilden (PA=Phosphatidsäure; PG=Phosphatidylglycerol; CL=Cardiolipin; CRD1=Cardiolipin-Synthase; ÄMM=Äußere Mitochondrienmembran; IMM=Innere Mitochondrienmembran). (B) Phänotypische Unterschiede von 9 Tage alten Wildtyp- und $\Delta PaCrd1$ -Stämmen auf M2-Medium. (C) Überlebenskurven vom Wildtyp (n=60) und der $\Delta PaCrd1$ -Mutante (n=17) bei 27 °C auf M2-Medium.

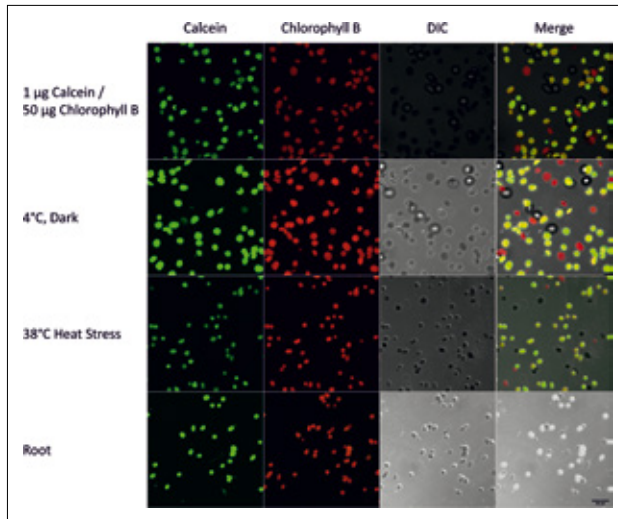


Bild 1: Juliane Friedrich bei der Vorbereitung von Zellen für ein Experiment. Die Zellen wachsen im Nährmedium in Zellkulturflaschen bei 37° C im Inkubator.

(Phosphosilpid in Bakterien und Mitochondrien) interagieren. In *In-vitro*-Analysen der Membranbindungseigenschaften an Modellmembranen konnte letztendlich die Auswahl auf ein Molekül (CLiB) eingegrenzt werden, das in weiterführenden Untersuchungen in dem Pilz *P. anserina* einen signifikanten Einfluss auf die Lebensspanne hat. Am Ende ihres Lebenszyklus unterliegen Mitochondrien einer Selbstverdauung (Nekroptose), bei der die Membrandynamik eine große Rolle spielt. Fehlfunktionen sind hier die Ursache vieler Krankheiten. Während des Projekts wurde ein besseres Verständnis der Regulierung und der Interaktion mit Reaktionskomponenten der Nekroptose erzielt, welches zur Aufklärung von wichtigen Krankheiten wie Krebs, Entzündungen und Autoimmunerkrankungen beitragen kann. Neue methodische Ansätze mit höherer Schnelligkeit und einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Zellmanipulation wurden entwickelt, um zu neuen Erkenntnissen in zentralen biologischen Prozessen beizutragen – insbesondere bei der Organisation von Membranrezeptoren und maßgeblich zur Aufklärung darüber, wie Rezeptoren in Netzwerken organisiert sind und damit der Stofftransport durch Membranbläschen in die Zelle geregelt wird.

Durch die Etablierung der Analyse der Anhäufung (Clustering) von Membranrezeptoren in 2D sowie der Auswirkungen der Signalübertragung auf Zellgestalt und -bewegung konnte mittels Lichtkontrolle die Organisation von Rezeptorclustern in der Plasmamembran von lebenden Zellen umorganisiert werden. Dies erlaubte eine sekundenschnelle Modulation der Clustergröße, -lokalisierung und -dichte und somit das Studium der Auswirkungen der Signalweiterleitung auf die Zellgestalt und Zellbewegung. Ferner wurde getestet, inwiefern eine für Stofftransport und Stoffabbau wichtige Ubiquitinierung die Membrankrümmung und die Spaltung von Zellorganellen während einer Legionellen-Infektion regulieren kann und dabei neue Erkenntnisse zu den Signalwegen und deren Auswirkungen insbesondere auf Störungen des Golgi-Apparates gewonnen werden können.

Eine wichtige Rolle bei Formgebung von Membranen sind flüssigkeitsgefüllte Tubuli (Stützstrukturen), wie sie z. B. in Chloroplasten auftreten, und dass sich diese mit einfachen elastischen Modellen analysieren lassen. Diese Ergebnisse tragen zu einem besseren Verständnis der physikalischen Mechanismen bei, die die morphologischen Strukturen von Zellorganellen bestimmen.



In-vitro-Induktion von Stromuls an isolierten Chloroplasten: Chloroplasten wurden isoliert, das Stroma der Chloroplasten wurde mit dem Farbstoff Calcein angefärbt und anschließend mit aufkonzentriertem Cytosol vermischt. Die Chloroplasten wurden daraufhin mithilfe eines Konfokalmikroskops auf Stromulbildung untersucht. Cytosolproben wurden aus 8 Tage alten Erbsen (*Pisum sativum*) aufbereitet, die entweder bei 4 °C und Dunkelheit über Nacht adaptiert wurden oder bei 38 °C hitzestress wurden. Zusätzlich wurde Wurzelextrakt aus Erbsen entnommen, die unter Normalbedingungen gewachsen sind. Alle Cytosolproben wurden auf 100 µg/µl Proteinkonzentration aufkonzentriert. Es ist zu sehen, dass das Cytosol der hitzestresserten Pflanzen sowie das Cytosol der Wurzeln im Vergleich zu der 4 °C Fraktion in der Lage ist, vermehrt Stromuls zu induzieren, was auf veränderte Proteinexpression unter diesen Konditionen schließen lässt. Dargestellt sind die Fluoreszenzen von Calcein, Chlorophyll B sowie der DIC (Differentialinterferenzkontrast) und der Zusammenschluss der verschiedenen Kanäle. Die Maßstabsskala zeigt 20 µm.

Membranen und der Membran anhaftende Komplexe (z. B. Proteine, Zucker) sind entscheidend in Zell-Zell-Interaktionen involviert. Diese können hervorragend mittels mikroskopischer Verfahren und neu entwickelten Probenhaltern untersucht werden. Dabei wurde gesehen, dass die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen in Membranen eingebetteten makromolekularen Komponenten zelluläre Anheftungsmechanismen von großer Komplexität und Vielfalt schaffen, um verschiedene Zwecke zu erfüllen. So konnte die Anordnung der Cadherinstränge (spezielle Protein-Zuckerstränge) in Desmosomen (Haftstrukturen zwischen Zellen) mittels Kryoelektronentomographie bestimmt werden und mittels Simulationen der Molekulardynamik bis auf die Ebene des Atoms zu einer Architektur der Struktur und Mechanik von Zell-Zell-Kontakten innerhalb von Geweben kombiniert werden. Zusätzlich erwiesen sich von Membranen vermittelte Zell-Zell-Interaktionen von Wirtszellen mit mikrobiellen Pathogenen als auch generell bei Infektionen als hoch interessant. Analysen in Kombination von elektronenmikroskopischen Studien unterstützt durch korrelative Lichtmikroskopie resultierten zum einen in der Darstellung des Infektionsprozesses auf Zellebene als auch in der Auflösung der dreidimensionalen Strukturen der bakteriellen Oberflächenproteine. Biologische Prozesse sind hochdynamisch in Raum und Zeit. Diese dynamische zeitliche Komponente ist experimentell nur über lichtmikroskopische Verfahren bei einer Auflösung von 50 – 100 nm aufzulösen. Molekulare dynamische (MD) Simulationen sind ein sehr eleganter Weg, höchstauflösende Strukturinformationen mit zeitaufgelösten mikroskopischen Daten zu kombinieren. Diese MD-Simulationen sind in der Lage, die innere Dynamik von Membranproteinen darzustellen.



Konfokales Laser Scanning Fluoreszenz Mikroskop LSM 880 von Zeiss mit zusätzlich ausgestattetem Zwei-Photonen Laser. Dieses Mikroskop dient Heike Krüger zum einen dazu, funktionalisierte 2D- und 3D-Oberflächen gezielt zu aktivieren und zum anderen in den aktivierten Bereichen immobilisierte Proteine und Peptide über deren Fluoreszenz-Signal zu visualisieren.

Erreichte Strukturentwicklung

Sowohl der SFB 1507 als auch das GK iMOL haben langfristige Förderperspektiven eröffnet sowohl durch die möglichen 12-jährigen Laufzeiten als auch dadurch, dass die Forschung auf dem Gebiet der Membrandynamik dauerhaft in Hessen auf international höchstem Standard etabliert wird, um die Nachhaltigkeit sicherzustellen.

Zur Stärkung der technologischen Entwicklung auf dem Gebiet der für die Membranforschung innovativen 3D-Bioprinting konnten Forschungsmittel von der EU (Horizon 2020, EXCELLENT SCIENCE – Future and Emerging Technologies (FET)) mit dem Projekt BRIGHTER erfolgreich innerhalb eines internationalen Konsortiums eingeworben werden. Dadurch wird die Entwicklung biologischer Modellstrukturen zur Forschung an lebenden dynamischen Systemen

gefördert, die an der Goethe-Universität im Bereich der 3D-Floureszenz-Lichtscheibenmikroskopie von besonderem Interesse sind.

Die Vernetzung von Zellbiologie, Mikroskopie und theoretischer Biologie ist in der aktuellen Forschung unerlässlich. Initiiert durch die Zusammenarbeit zwischen den Arbeitskreisen sind wichtige Projekte entstanden, die in neu entstandenen Konsortien bearbeitet werden. Zu nennen sind hier vor allem der LOEWE-Schwerpunkt CMMS (Center for Multiscale Modelling in Life Sciences), welcher sich mit der Mehrskalen-Modellierung, Analyse und Simulation biologischer Prozesse befasst. In diesem Rahmen wird weiterhin aktiv an der mathematischen Beschreibung von experimentell gewonnenen Daten gearbeitet.

Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld

Die Bedeutung von DynaMem für das Forschungsfeld liegt zum großen Teil in der strategischen Ausrichtung, die mit der Erforschung von grundlegenden Mechanismen von Membranzusammensetzung und deren dynamischen Veränderungen sowie den Dynamiken und Funktionen in Organellen bis hin zur Bedeutung von membrandynamischen Prozessen bei Krankheiten breit und interdisziplinär aufgestellt wurde. Die Verbindung mit Computersimulationen zur Vorhersage und Überprüfung von Forschungsergebnissen hebt die Qualität und die Perspektiven der Forschung auf ein neues Niveau.

Frankfurt hat im Feld der Membranbiologie seit langer Zeit internationale Sichtbarkeit. Mit DynaMem ist dies auch im Bereich der Erforschung der Membrandynamik interdisziplinär gelungen, fundamntiert durch die neu eingeworbenen Forschungsverbundprojekte. In den vergangenen Jahrzehnten wurde auch eine international herausragende Infrastruktur in Frankfurt und Mainz aufgebaut, die für die Forschung in diesem Feld erforderlich ist. Durch die Kooperationen mit den Universitäten in Frankfurt und Mainz, dem MPI Biophysik (Frankfurt) und dem MPI



Das Foto zeigt ein 900 MHz NMR-Spektrometer, das die Strukturaufklärung von Proteinen in Lösung ermöglicht. Auch Interaktionen von Medikamentenkandidaten mit Proteinkomplexen können damit untersucht werden, um die genaue Bindungs- und Wirkungsweise besser verstehen können. In DynaMem wird damit die Struktur der Transmembrandomäne und der Interaktion von Agonisten und Antagonisten des Fibroblasten-Wachstumsfaktorrezeptoren (FGFRs)- und Fibroblasten-Wachstumsfaktor (FGF)-Systems untersucht.

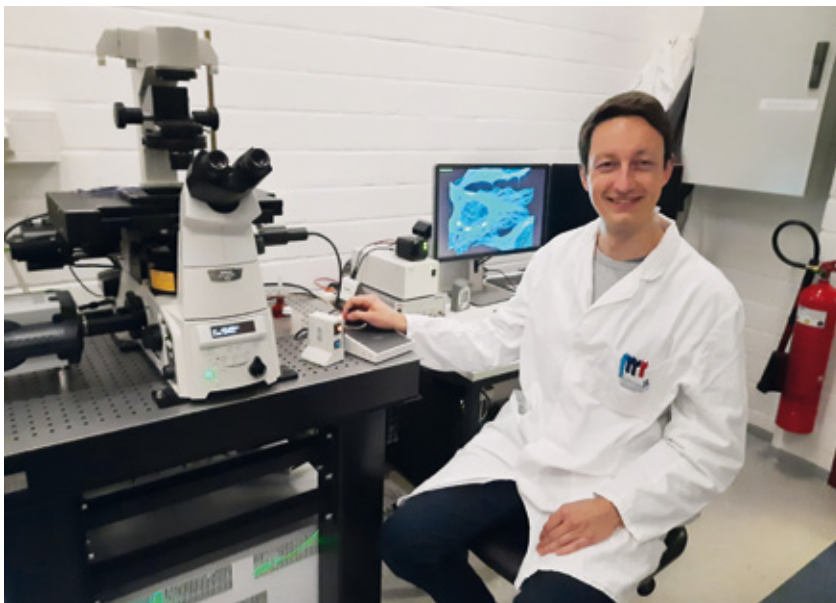
Polymerforschung (Mainz) wurde die international anerkannte Expertise im Bereich der Membranmodellsysteme, der Membranbiologie, der Analyse von makromolekularen Proteinkomplexen und der medizinisch/klinischen Forschung gestärkt.

Die Vielzahl der Veröffentlichungen erhöhte die internationale Sichtbarkeit der Membrandynamikforschung der beteiligten Standorte. Zahlreiche neugegründete Kooperationen auf internationaler Ebene aber auch im Rhein-Main-Gebiet mit immer mehr wissenschaftlichen Disziplinen fördern die Vielfalt der aktuellen und zukünftigen Forschung auf dem Gebiet und dokumentieren deren steigende Bedeutung und Sichtbarkeit.

Wichtigste Meilensteine des Projekts



11.06.2019: Philipp Gerbhardt präsentiert das Projekt am LOEWE-Stand des Hessentags 2019.



Mithilfe von Fluoreszenzmikroskopen können höchst aufgelöste Bilder von zellulären Strukturen erhalten werden. Mark Schröder bei der Aufnahme des Zytoskeletts einer Krebszelle.



Konstantin Grohmann an einem Cryo-Zweistrahler-Rasterelektronenmikroskop zur Betrachtung einer nativ eingefrorenen Probe. Mittels fokussiertem Ionenstrahl lässt sich die Probe zu einer 200 nm-dünnen, und somit Elektronen-transparenten, Lamelle schneiden, welche im Anschluss am Cryo-Transmissions-Elektronenmikroskop tomographisch untersucht werden kann. Ziel ist die detaillierte Untersuchung und strukturelle Charakterisierung von Zell-Zell-Kontakten.

Weitere Informationsmöglichkeiten

- <https://www.bio.uni-frankfurt.de/60615854/DynaMem>
Webseite des LOEWE-Schwerpunktes DynaMem
- https://www.bmls.de/news/news-2017/5th_July.html
Kurzbeschreibung des LOEWE-Schwerpunktes
- <https://www.rhein-main-universitaeten.de/forschung/dynamem-dynamik-von-membranen-molekulare-grundlagen-und-theoretische-beschreibungen>
Kurzbeschreibung des LOEWE-Schwerpunktes unter den Projekten der Rhein-Main Universitäten
- https://issuu.com/goethe-university/docs/i_einblick_52/s/17482774
Bedeutung von Forschungsverbänden der Rhein-Main Universitäten (inklusive DynaMem)
- <https://wissenschaft.hessen.de/Forschen/Landesprogramm-LOEWE/Die-Foerderstaffeln-von-LOEWE/10-LOEWE-Foerderstaffel>
Kurzbeschreibung des LOEWE-Schwerpunktes auf der Webseite des HMWK
- <https://fias.institute/en/events/gsic2020>
Webseite der Konferenz & Sommerschule 2021

Zahlen und Fakten¹

Förderzeitraum	01.01.2018 – 30.06.2022
Bewilligte LOEWE-Mittel in Euro	4.431.744
Bewilligte Drittmittel in Euro	23.528.579
Beschäftigte insgesamt ²	30
darunter LOEWE-finanziert	8
Erfolgreich abgeschlossene Promotionen	7
Erfolgreich abgeschlossene Habilitationen	–
Wissenschaftliche Publikationen	85
Fachvorträge auf wissenschaftlichen Tagungen/Konferenzen	69
Angemeldete Patente	–
darunter bereits erteilt	–

¹ Die Angaben beziehen sich mit Ausnahme der Beschäftigten auf die gesamte Projektlaufzeit.

² Die Anzahl der Beschäftigten bezieht sich auf alle Beschäftigten, die an dem LOEWE-Projekt mitgearbeitet haben, in Vollzeitäquivalenten, unabhängig von ihrer Finanzierung, Stichtag 31.12. des letzten Förderjahres.

Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute

Goethe-Universität Frankfurt am Main

<https://www.uni-frankfurt.de/>

Die Goethe-Universität Frankfurt am Main ist eine forschungsstarke Hochschule in der europäischen Finanzmetropole Frankfurt. 1914 gegründet mit rein privaten Mitteln von freiheitlich orientierten Frankfurter Bürgerinnen und Bürgern fühlt sie sich als Bürgeruniversität bis heute dem Motto „Wissenschaft für die Gesellschaft“ in Forschung und Lehre verpflichtet. Mit mehr als 43.000 Studierenden, 576 Professorinnen und Professoren, 3.043 wissenschaftlichen Mitarbeitenden, 19 Nobelpreisträgerinnen und Nobelpreisträgern sowie einem Gesamthaushalt (2021) von 725,2 Millionen Euro ist die Goethe Universität eine der größten Universitäten Deutschlands. Am 1. Januar 2008 gewann die Goethe-Universität mit der Rückkehr zu ihren historischen Wurzeln als Stiftungsuniversität ein einzigartiges Maß an Eigenständigkeit.



Johannes Gutenberg-Universität Mainz

<https://universitaet.uni-mainz.de/>

Die Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) zählt mit rund 30.000 Studierenden aus 120 Nationen zu den großen und vielfältigsten Universitäten Deutschlands. Mit ihrer Universitätsmedizin, ihren Hochschulen für Kunst und Musik sowie ihrem Fachbereich Translations-, Sprach- und Kulturwissenschaft in Gernersheim vereint sie nahezu alle akademischen Disziplinen. In ihren mehr als 100 Instituten und Kliniken lehren und forschen rund 4.600 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, darunter 580 Professorinnen und Professoren. Mit 76 Fächern und zahlreichen Fachkombinationen bietet sie 296 Studiengänge an. Zurzeit ist die Spitzenforschung der JGU insbesondere in den folgenden drei Bereichen international profiliert: der Teilchen- und Hadronenphysik mit dem Exzellenzcluster PRISMA+, den Materialwissenschaften mit der Quantentechnologie, den Lebenswissenschaften und der Translationalen Medizin.



Max-Planck-Institut für Biophysik

<https://www.biophys.mpg.de>

Das Max-Planck-Institut für Biophysik (MPIBP) ist eine Forschungseinrichtung der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V. mit Sitz in Frankfurt am Main unter der Leitung von Nobelpreisträger Hartmut Michel. Das Hauptforschungsgebiet ist die Untersuchung der Funktionsweise und Struktur von Membran- und Transportproteinen bis hin zu der räumlichen Anordnung komplexer Molekülsysteme und deren funktionalem Zusammenspiel. Die vier Abteilungen des MPIBP sind Molekulare Membranbiologie, Strukturbiologie, Theoretische Biophysik und Molekulare Soziologie. Die Kerntechniken Röntgenkristallographie, hochauflösende Elektronenmikroskopie und Spektroskopie werden durch computergestützte Modellierung und lichtmikroskopische Methoden ergänzt.



Max-Planck-Institut für Polymerforschung

<https://www.mpip-mainz.mpg.de>

Am Institut arbeiten derzeit über 500 Mitarbeiter aus dem In- und Ausland mit dem Ziel der Herstellung und Charakterisierung von Polymeren, um Grundlagenwissen für neue Anwendungen in den Bereichen Elektronik, Energietechnik, Medizin, Fahrzeugbau und Materialtechnik zu erschließen. Das Institut widmet sich der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der weichen Materie, insbesondere von Polymeren. Ziel ist der Erkenntnisgewinn über Zusammenhänge von chemischer Struktur, physikalischen Eigenschaften und Funktion makromolekularer Materialien. Zu diesem Zweck ist die wissenschaftliche Arbeit des MPI-P nicht streng in Abteilungen, sondern fächerübergreifend organisiert.



HESSEN



Das Forschungsförderungsprogramm LOEWE ist eine Förderinitiative des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur.

Impressum

Herausgeber:

Hessisches Ministerium
für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur
Rheinstraße 23 – 25
65185 Wiesbaden

Inhalt:

LOEWE-Schwerpunkt DynaMem
Dynamik von Membranen: Molekulare Grundlagen
und Theoretische Beschreibung

Redaktion:

LOEWE-Geschäftsstelle im Hessischen Ministerium
für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur

Layout:

Christiane Freitag, Idstein

Fotos und Grafiken:

LOEWE-Schwerpunkt DynaMem
Dynamik von Membranen: Molekulare Grundlagen
und Theoretische Beschreibung
Titel: © Prof. Dr. Achilleas Frangakis, Goethe-Universität Frankfurt am
Main; S. 3 Abb. 1: © Lotta Hof, Goethe-Universität Frankfurt am Main,
Abb. 2: © Prof. Heinz-Dieter Osiewacz und Aljoscha Joppe;
S. 4: © Senthana Shanmugalingam, Universitätsklinikum der Goethe-
Universität Frankfurt am Main; S. 5 Abb. 1: © Prof. Dr. Enrico Schleiff,
Philipp Gebhardt, Abb. 2: © Heike Krüger, Goethe-Universität Frank-
furt am Main; S. 6: © Bruno Hargittay, Goethe-Universität Frankfurt am
Main; S. 7 Abb. 1: © Isabell Kleinwächer, Johannes Gutenberg-
Universität Mainz, Abb. 2: © Christoph Spahn, Goethe-Universität
Frankfurt am Main, Abb. 3: © Utz H. Ermel, Goethe-Universität
Frankfurt am Main