Abschlussbericht

Titel des Vorhabens: A synergistic combination of heterogenous-, homogeneous- and biocatalysis for sustainable chemicals and energy carriers production from renewable resources

Projektnummer/Aktenzeichen: W10/2018

Executive Summary

Das Hauptziel von ComBioCat war es, einen grundlegenden Wandel in der nachhaltigen Produktion von wertvollen Materialien, Chemikalien und Kraftstoffen durch hocheffiziente und saubere katalytische Umwandlungen von Biomasse zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde die Homo-, Hetero-, Photo- und Biokatalyse integriert und der Einsatz plasmagestützter Materialien und Membrantechnologien einbezogen. Darüber hinaus wurde die interdisziplinäre Plattform des Campus für die Ausbildung junger Forscher in diesen verschiedenen Aspekten der Katalyse und Nachhaltigkeit genutzt. Die Meilensteine waren ambitioniert und konnten in vielen Fällen erreicht werden. Es sind mehr als 30 wiss. Publikationen entstanden, 6 Patentanmeldungen sind in Vorbereitung. Es wurden mehrere internationale Symposien veranstaltet. Präsenzveranstaltungen aller Art waren jedoch aufgrund von Corona-Schutzmaßnahmen lange Zeit nur eingeschränkt möglich. Dennoch ist aus dem Campus der Ostsee-Lehrverbund Katalyse hervorgegangen, und die Einwerbung eines DFG-Graduiertenkollegs sowie einer DFG-Forschungsgruppe konnten unterstützt werden. Die im Rahmen von ComBioCat etablierten Kooperationen und Infrastruktureinheiten sollen weiterentwickelt werden.

1. Zielerreichung und Umsetzung der Meilensteine

Arbeitspaket 1: Innovative nachhaltige Produktionsketten hochveredelter Chemikalien auf der Basis von (künstlichen) Metalloenzymen (Leiter: Uwe Bornscheuer)
PhD1 (Jan-Ole Moritz, Betreuer: Paul Kamer/Hans de Vries):
Meilenstein 1.1: Hohe Regio- und Enantioselektivität in der Pd-katalysierten asymmetrischen Allylsubstitution (AAS)
Biokonjugationsreaktionen von Enzymen mit einer Vielzahl von Phosphinen für die Pd-kat. AAS oder eine künstliche Hydroformylase konnten aufgrund von inkompatiblen Reaktionsbedingungen, die zur Denaturierung des Proteins führten, nicht erreicht werden.
MS 1.2: Hohe Enantioselektivität in der Cu-katalysierten AAS nicht-aktivierter Substrate
Cu-Komplexe, die in das Proteingerüst integriert werden sollten, wurden mit nur teilweisem Erfolg entwickelt. Von PhD10 wurde ein Übersichtsartikel dazu verfasst.
PhD2 (Henrik Terholsen, Betreuer: Uwe Bornscheuer):
MS 1.3: Selektive chemo-enzymatische Redoxkatalyse mit Biomasse-basierten Alkenen
Mit einer BsPAD-Mutante (bakterielle Phenolsäure-Decarboxylase) wurde ein vielversprechendes Gerüst für die Entwicklung eines künstlichen Metalloenzyms entwickelt.
PDRA1 (Alexander Lammers, Karen Methling; Betreuer: Michael Lalk):
MS 1.4: Identifikation von Produkten und Intermediaten in komplexen kat. Mischungen
Es wurden NMR-basierte Techniken zur Identifizierung und Quantifizierung von Produkten biokat. Reaktionen entwickelt und zur Untersuchung unbekannter Enzymfunktionen genutzt.
PhD3 (Paul Lehmann, Betreuer: Udo Kragl):
MS 1.5: Reaktionskompartimente auf Basis polymerisierter Ionischer Flüssigkeiten (IL)
Es wurden IL-basierte Reaktionskompartimente erzeugt und für den Einsatz von Kat. (am Bsp. Lipase CaLB) in kontinuierlichen Reaktoren genutzt. Aus Kohlenhydraten (KH) wurden neuartige ILs hergestellt.

Arbeitspaket 2: Neuartige (photo-)katalytische Produktionsmethoden, ausgehend von CO_2 als C1-Baustein (Leiter: Jennifer Strunk)
PhD4 (Alexander Wotzka, Betreuer: Sebastian Wohlrab):
MS 2.1: (Poly)carbonate aus CO_2 über eine heterogen-enzymatische Kaskadenreaktion

CO_2 aus Luft kann an Ce-Zr-Mischoxiden ad- und desorbiert werden. Die Umsetzung mit Methanol ist daran möglich, aber langsam und unselektiv. Folge-Rkt. waren schwer zugänglich.

PhD5 (Igor Medic, Betreuer: Jennifer Strunk):

MS 2.2: Synthese von mind. einer nützlichen größeren Verbindung aus CO_2

Eine Plattformchemikalie konnte über eine Reaktionskaskade von photokat. CO_2-Reduktion und anschließender enzymatischer Umsetzung nicht erhalten werden, da die Ausbeuten im ersten Reaktionsschritt nicht auf ein präparativ nutzbares Niveau gesteigert werden konnten.

PhD6 (Sepideh Mousazadeh Borghei, Betreuer: Volker Brüser):

MS 2.3: Immobilisierte Katalysatorkaskade hergestellt und mit Polymer ummantelt

Es wurden Cu-Photosensibilisatoren (PS) durch Plasmapolymerisation von Methan und Allylalkohol auf TiO_2-Trägern fixiert. Damit konnten bei der Reduktion von CO_2 höhere CO-Erzeugungsraten als mit nicht fixierten PS erhalten werden (mit PhD7).

PhD7 (Hilario Diego Huerta, Betreuer: Henrik Junge):

MS 2.4: CO_2-Red. zu einer C_1- oder C_2-Plattformchemikalie über eine immobilisierte Kaskade

Die photokat. CO_2-Reduktion zu CO wurde mit Hilfe von Cu-PS – TiO_2-Nanokompositen und Nicht-Edelmetall-Reduktionskatalysatoren erfolgreich durchgeführt (mit PhD6).

PhD8 (Maria Logotheti, Betreuer: Matthias Höhne):

MS 2.5: Grundsatzbeweis für eine photo-enzymatische Kaskadenreaktion erbracht

Zwei Modellreaktionen, jede bestehend aus einem photokat. und einem enzymatischen Schritt, wurden identifiziert. Die einzelnen Schritte (Photorkt. und Enzymkat.) wurden optimiert.

PhD9 (David Kotwica, Betreuer: Ralf Ludwig):

MS 2.6: Mechanistisches Verständnis der (photo)katalytischen Umsetzung von CO_2

In situ-IR-Spektroskopie wurde für folgende Untersuchungen eingesetzt: 1. CO_2-Red. mit Mn-Pincer-Komplex und Ru-PS; 2. CO_2-Aufnahme und Umsetzung zu Formiaten in Lysin-basierten IL; 3. Untersuchung von Carboxy-funktionalisierten IL. Die zeitaufgelösten Spektren wurden mit Hilfe von Reinkomponentenzerlegung und quantenchem. Berechnungen ausgewertet.

Arbeitspaket 3: Produktion von Aromaten aus erneuerbaren Rohstoffen aus Biomasse (Leiter: Esteban Mejía)

PhD10 (Paul Hünemörder, Betreuer: Esteban Mejía):

MS 3.1: Nutzung des SOMO eines photogenerierten Radikals eines elektronenreichen Olefins in einer Cycloaddition unter umgekehrten Anforderungen mit einem Furandiester zur Erzeugung eines Diels-Alder-Produkts

Die für die Synthese von TPA aus Furanderivaten erforderlichen Cycloadditions-Zwischenprodukte wurden trotz vieler Bemühungen nicht erhalten. Der Schwerpunkt des Projekts wurde auf die Nutzung photogenerierter Radikale für kreuzdehydrierende Kopplungen verschoben.

MS 3.2: Steigerung der Effizienz dieser herausfordernden photoinduzierten Diels-Alder-Reaktion durch Nutzung künstlicher Kupfer-Enzyme

Zusammen mit PhD8 wurden Docking-Studien an einem vielversprechendes Proteingerüst durchgeführt. Unter biologisch relevanten Bedingungen (wässrige Medien) war eine kreuzdehydrierende Kopplung als Modellreaktion nicht erfolgreich.

MS 3.3: Dehydratisierung des DA-Produkts mit Hilfe eines Zeoliths zu Terephthalat

Diese Reaktion wurde nicht untersucht, da die Vorstufen nicht realisiert werden konnten.

PhD11 (Shasha Zheng, Betreuer: Hans de Vries):

MS 3.4: Erfolgreiche Oxidation eines β-Ketoalkohols zum Ketoaldehyd

Dieses Ziel wurde mit Hilfe eines Cu-Katalysators erfolgreich realisiert. Die Ergebnisse wurden publiziert (*Chem. Commun.* **2002**, *58*, 4639).

MS 3.5: Reduktion eines β-Ketoalkohols zum Diol über chemo- und biokat. Ansätze

In anfänglichen Screening-Versuchen wurden vielversprechende Ergebnisse mit KRED-Enzymen erhalten. Beim Upscaling war jedoch die Reproduzierbarkeit problematisch.

MS 3.6: Erfolgreiche Kondensation von Dihydroxyaceton und Acrolein

Dieser MS wurde nicht erreicht. Da jedoch MS 3.4 realisiert war, wurde die Zyklisierung von 2,5-Dioxohexanal durchgeführt. So wurden 1,4-substituierte Benzolringe synthetisiert.

MS 3.7: Erfolgreiche Bildung von Acrylsäure aus Biomasse

Wegen der erfolgreichen Ergebnisse bei der Zyklisierung von oxidiertem 1-Hydroxyhexan-2,5-dion (HHD) lag der Fokus auf diesem Thema, und das Ziel MS 3.7 wurde nicht weiterverfolgt.

PhD12 (Rajesh Dasi, Betreuer: Malte Brasholz):
MS 3.8: Entwicklung der Radikalchemie der Biomasse-basierten Furan-Chemikalie Chlormethylfurfural (CMF)
ATRA-Reaktionen von CMF wurden erfolgreich entwickelt.
MS 3.9: Entwicklung photokatalytischer C-H-Funktionalisierungen von Terpenen
Die photokatalytische C-H-Fluorierung von Betulin wurde in mäßiger Ausbeute erreicht.

Das Gesamtbudget wurde eingehalten. Umwidmungen zwischen den Kostenarten gab es i.W. beim Ansatz für Projekttreffen und Veranstaltungen. Bedingt durch die Corona-Schutzmaßnahmen mussten Präsenzveranstaltungen z.T. abgesagt oder in virtueller Form durchgeführt werden. Die dafür vorgesehenen Mittel wurden für personellen Mehrbedarf verwendet, der v.a. durch Corona-bedingte Verzögerungen in der Projektbearbeitung (Kontaktsperren, verlängerte Lieferfristen o.ä.) verursacht wurde. Der Eigenanteil an der Finanzierung wurde um mehr als 10% gegenüber der Planung überschritten, i.W. aufgrund einer deutlichen Erhöhung der Gemeinkosten (Betriebskostensteigerung, Inflation etc.).

2. Aktivitäten und Hindernisse

Im LIKAT wurde erstmals ein biologisches Sicherheitslabor eingerichtet. An der Univ. Greifswald wurden verschiedene Protein-Mutanten hergestellt und in unterschiedlichen Teilprojekten für kat. Umsetzungen funktionalisiert. Die Verknüpfung von Proteinen mit Metallkomplexen bzw. die Metallierung scheiterte teilweise an Inkompatibilitäten der erforderlichen Reaktionsbedingungen. Für Reaktivitätstests von Cu-Kat. für photokat. Allylsubstitutionen wurden N-haltige Liganden mit Maleimid-Linker ohne Protein nur mit begrenztem Erfolg synthetisiert (Reaktivität des Maleimids). Eine Anbindung an Proteine gelang nicht. Es wurden künstl. Metalloenzyme für die photokat. CO_2-Red. auf Basis von BsPAD geschaffen. Darin sind neuartige CO_2-Reduktionskat. auf Fe-Basis über Linker an die Proteine gebunden. In Gegenwart eines Ru-PS und eines Opferreagenzes wurde CO gebildet. Der Elektronentransfer scheint geschwindigkeitsbestimmend zu sein. Die photokat. Red. von CO_2 wurde auch unter Verwendung eines Cu-PS durchgeführt. Ein optimiertes PS-TiO_2-Komposit war ebenso aktiv. Darüber hinaus wurde das Material mittels plasmaunterstützter chem. Abscheidetechniken mit verschiedenen Polymerschichten überzogen und erfolgreich bei der CO_2-Red. getestet. Bei der CO_2-Umwandlung in der Gasphase unter Plasma-Bedingungen wurde in einem zylindrischen DBD-Reaktor in Gegenwart von Formiat-Dehydrogenase mehr Ameisensäure gebildet als ohne Enzym. An verschiedenen kat. Prozessen, die in ComBioCat bearbeitet wurden, wurden mechanistische Studien mittels in situ-IR-Spektroskopie durchgeführt. Im Fokus stand der Spektralbereich von Carbonylgruppen, der für die CO_2-Red. von besonderer Bedeutung ist. In der photokat. CO_2-Red. wurden auch (selbst-)dotierte, insbes. partiell reduzierte, Ti-Oxide untersucht, die höhere Aktivitäten und bessere photophysikalische Eigenschaften als unmodifiziertes TiO_2 versprechen. Diese zeigen gute Aktivitäten in der H_2-Entwicklung. Der attraktivste Weg zur Gewinnung und Umsetzung von CO_2 ist dessen Abscheidung aus der Luft an Oberflächen spezieller Adsorbenzien/Katalysatoren. Es wurden $Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ und andere Materialien untersucht, insbes. im Hinblick auf Feuchtigkeit.
Neben dem Schwerpunkt CO_2-Red. wurde die Nutzbarmachung klassischer nachwachsender Rohstoffe bearbeitet. An Biomasse-basierten Furanen, speziell dem CMF, konnte eine erste Radikalreaktion in Form einer Boran-kat. Atomtransfer-Radikalreaktion mit Styrolen entwickelt werden. Am polycyclische Terpen Betulin aus Birkenrinde wurden in verschiedenen photokat. Methoden C-H-Fluorierungsreaktionen sowie Gerüstabbaureaktionen durchgeführt. Weiterhin wurden neue photosensibilisierte [2+2]- und [3+2]-Cycloadditionen von Chromonen mit Alkenen entwickelt, sowie dehydrogenierende photokat. Aza-Paternò-Büchi-Reaktionen. Die biogene Plattformchemikalie 5-(Hydroxymethyl)furfural wurde in HHD umgewandelt und nach Oxidation zu 2,5-Dioxohexanal (DOH) durch Weiterreaktion mit prim. Ammoniumsalzen in N-substituierte Hydroxypyridiniumsalze überführt. Aus DOH können 1,4-disubstituierte Benzolringe mit tert. Amino- oder OH-Gruppen erhalten werden. HHD wurde mit KRED-Enzymen selektiv hydriert. Im größeren Maßstab war die Reproduzierbarkeit problematisch. Es wurden KH-basierten IL für die enzymatische Veresterung hergestellt. Für Hydrogele auf Basis polymerisierter IL war die enzymatische Reaktion wg. Stofftransportlimitierungen oder ungünstiger

Verteilungskoeffizienten stark verlangsamt. Bei anderen neuartigen KH-basierten IL traten diese Probleme bei Beschichtung einer trägerfixierten Lipase nicht auf. Weiterhin wurde die Kaskade einer photoabhängigen Oxyfunktionalisierung von achiralen Alkanen zu den entsprechenden Carbonylverbindungen und einer anschließenden enzymkat. asymm. Umwandlung untersucht. Die photokat. Oxidation von Modellsubstraten war teilweise erfolgreich. Aufgrund von Kompatibilitätsproblemen wurde anschließend die Hydroacylierung von Alkenen als Alternative zur Herstellung des Ketons im ersten Schritt untersucht. Es wurden Ag-haltige Nano-C/SiO_2-Komposite aus Abfall-Reisspelzen entwickelt und damit das Problem zunehmender Antibiotikaresistenzen adressiert. Die antimikrobiellen Effekte dieser Komposite wurden evaluiert. Zur Identifizierung und Quantifizierung von Produkten kat. und biokat. Reaktionen wurden (Hochfeld-) NMR-basierte Methoden entwickelt und so unbekannte Funktionen von Enzymen aufgedeckt. U.a. wurden zusammen mit der Univ.-Medizin kleine Moleküle in Covid19-Impfstoffen identifiziert, um den Mechanismus der impfstoffinduzierten thrombozytären Thrombozytopenie (VITT) aufzuklären.

3. Ergebnisse und Erfolge

Im Rahmen des LWC sind >30 wiss. Publikationen entstanden. Es sind 6 Patentanmeldungen in Vorbereitung. Acht Dissertationen sind bereits abgeschlossen, weitere werden derzeit fertiggestellt. Der Campus wurde von regelmäßigen Pressemitteilungen flankiert. Es wurden zwei internationale Symposien ausgerichtet (2021 virtuell, 2022 Präsenz). Die Veranstaltung 2020 musste Corona-bedingt abgesagt werden. Im Jahr 2021 wurde eine virtuelle Spring School durchgeführt, bei der Nachwuchswissenschaftler in allen Katalysedisziplinen sowie der Plasmatechnologie unterrichtet wurden. Dies war der Ausgangspunkt für die Gründung des Ostsee-Lehrverbunds Katalyse, der das Format unter dem Dach der GeCatS seit 2022 mit jährl. Summer Schools fortsetzt. Neben den ComBioCat-Partnern sind daran auch die CAU Kiel sowie die Univ. und die TU Hamburg beteiligt. Die im Projekt erzielten Ergebnisse der Gruppen Junge/Beller, Strunk und Ludwig haben die erfolgreiche Einwerbung eines Graduiertenkollegs „Spektroskopische Methoden für herausfordernde Reduktionsreaktionen – Katalytische Kupplung von CO_2“ unterstützt. Die DFG fördert das Vorhaben an der Univ. Rostock mit >5 Mio. € ab 2024. Sprecher ist R. Ludwig. Auch die erfolgreiche Einwerbung der DFG-Forschungsgruppe „Mehrstufige katalytische Produktionssysteme für die Feinchemie durch integriertes Design von Molekülen, Materialien und Prozessen“ fußt auf ComBioCat-Vorarbeiten. Neben dem LIKAT und der Univ. Rostock sind die Univ. und das MPI Magdeburg beteiligt.

4. Chancengleichheit, Karriereförderung und Internationalisierung

Ein exzellentes Arbeitsumfeld ist der Schlüssel für Höchstleistungen in der Wissenschaft. Chancengleichheit und Gleichstellung der Geschlechter stellen dafür entscheidende Voraussetzungen dar. INP und LIKAT bekennen sich zu den Leibniz-Gleichstellungsstandards und wurden wiederholt mit dem Total-E-quality-Zertifikat ausgezeichnet. Sie wenden das Kaskadenmodell an, um Chancengleichheit auf allen administrativen und wiss. Qualifikationsstufen zu schaffen und so das vorhandene Potenzial für Führung, Forschung und Lehre zu nutzen. Es werden Maßnahmen ergriffen, um organisatorische Probleme bei der Familiengründung zu überwinden (Heimarbeit, „Come-Back-Fonds“ zur Verlängerung von Arbeitsverträgen etc.). Die Nachwuchsförderung orientiert sich an der Leibniz-Richtlinie Karriereentwicklung bzw. der Handreichung Personalentwicklung. Wiss. Mitarbeiter auf allen Ebenen – von Doktoranden über Gruppen- bis Abteilungsleiter – werden im Sinne einer Auswahl der besten Köpfe im internationalen Wettbewerb rekrutiert.

5. Strukturen und Kooperationen

Die Zusammenarbeit zwischen den Teilprojekten ist i.A. wie geplant verlaufen. Die Synergien waren naturgemäß vom Fortgang der Projekte abhängig. Der plötzliche Tod des Campus-Sprechers, P. Kamer, hat die Kooperationen seiner Gruppe, insbes. mit der Univ. Greifswald, erschwert. Die fehlende wiss. Expertise konnte nicht vollständig kompensiert werden. Die

Sprecherrolle wurde vorübergehend von H. de Vries übernommen, dann von J. Strunk. Innerhalb des LWC haben sich jedoch auch neue Kooperationen entwickelt, z.B. haben die Gruppen Lalk und Mejía auf dem Gebiet von Ag-beschichteter Biomasse zur Bekämpfung multiresistenter Keime zusammengearbeitet. Folgende externe Kontakte sind hervorzuheben: PhD1 wurde von A. Jarvis (Univ. Edinburgh) co-betreut und im Bereich der Proteinanalytik/ ESI-MS ausgebildet (M. Glocker, Univ.-Medizin Rostock). Beim Modelling arbeitete er mit M. Bühl (Univ. St. Andrews) zusammen, außerdem mit F. Hollmann (TU Delft). Die Brüser-Gruppe hat mit L.V. Simonchik (NAS Belarus) eine vom BMBF geförderte Zusammenarbeit (PlaBiU) zur plasmagestützten Herstellung von Synthesegas aus Biogas begonnen. Aufgrund der Corona-Beschränkungen waren persönliche Kontakte, Reisen und kurzfristige Aufenthalte in kooperierenden Laboren sowie alle Art von Präsenz-Veranstaltungen stark eingeschränkt. Virtuelle Treffen, Telefonate und Emails waren oft kein gleichwertiger Ersatz. Kooperationen fanden i.d.R. nur bilateral statt. Der Campus-Gedanke konnte deshalb nur eingeschränkt gelebt werden.

6. Qualitätssicherung

Zwischen Betreuern und Doktoranden wurden auf der Grundlage der allg. Promotionsordnung Betreuungsvereinbarungen abgeschlossen. Es fanden regelmäßige Besprechungen und Seminare statt, um die Ergebnisse auszuwerten und neue Experimente zu planen. Der aktuelle Stand der Literatur wurde dabei immer berücksichtigt. Die gewonnenen Daten wurden ausschließlich auf eigenen Medien der jeweiligen Einrichtung gespeichert. Die wiss. Ergebnisse wurden auf Konferenzen, Workshops und in Fachzeitschriften veröffentlicht, größtenteils mit Open Access. Die Einhaltung der Regeln guter wiss. Praxis wurde durch Ombudspersonen in allen Partnereinrichtungen sichergestellt. Tierversuche wurden nicht durchgeführt.

7. Zusätzliche Ressourcen

Der LWC wurde während der Gesamtlaufzeit mit Eigenmitteln der jeweiligen Partnereinrichtungen in folgender Höhe kofinanziert: LIKAT 444 T€ (Personal) / 66 T€ (Sachmittel) / 692 T€ (Investitionen); INP 24 T€ / 38 T€ / 153 T€; Univ. Rostock 265 T€ / 0 / 142 T€; Univ. Greifswald 283 T€ / 0 / 153 T€; Landesregierung MV 100 T€ (Investition). In Summe sind dies ca. 2,36 Mio. Euro. Darüber hinaus wurden in allen Einrichtungen signifikante Leistungen in den Bereichen Verwaltung, Technik/Infrastruktur und insbes. Analytik erbracht.

8. Ausblick

Im Rahmen von ComBioCat etablierte Kooperationen werden weitergeführt und ausgebaut. Gemeinsam erarbeitete Technologien und techn. Infrastruktur werden über das Projektende hinaus genutzt und weiterentwickelt, z.B. ein Mikroreaktor für het. Katalysatoren, der um Module zur blasenfreien Begasung und Membranfiltration erweitert werden soll (Kragl), oder die zeitaufgelöste IR-Spektroskopie mit Hilfe eines Lasersystems zur Anregung der kat. Komplexe bis in den ns-Bereich (Ludwig). Es werden weitere künstl. Metalloenzyme für kat. Reaktionen wie Kreuzkupplungen und asymm. Synthesen erzeugt und optimiert. Auch die Kombination von Enzymen mit hom. oder het. Kat. bietet noch großes Potenzial (Bornscheuer, Brüser, Höhne, Junge, Mejía, Tin). Dabei werden u.a. Bioaktivitätsscreenings von Produkten aus kat. und biokat. Ansätzen eingesetzt (Lalk). Die photokat. CO_2-Red. mit den bedeckten PS-TiO_2-Kompositen wird weiter optimiert, um eine verbesserte Stabilität dieser Systeme durch die Polymerschichtbedeckung zu zeigen (Brüser, Junge). Zur Erhöhung des Anteils an C_2-Reduktionsprodukten wird nach alternativen Photokat. (Z schemes etc.) gesucht (Strunk). Für großtechnische Anwendungen wird mit einem führenden internationalen Industrieunternehmen an einem stabilen Adsorptionsmittel für CO_2 gearbeitet (Wohlrab). Auch die Veredelung biogener Rohstoffe wird weiterverfolgt: Es werden kat. Methoden untersucht, um natürliche polycyclische Terpene in höherwertige Produkte umzuwandeln. Die Zyklisierungsreaktion von 2,5-Dioxohexanal wurde bereits im Nachgang zur Projektförderung publiziert (*Nature Sustain.* **2023**, *6*, 1436).