

ANLAGE I: Gemeinsame Vorhaben

Themenübergreifende Vorhaben des Fortsetzungsantrages

Eine besondere Bedeutung kommt bei diesen fachübergreifenden Kooperationen der Etablierung und Nutzung neuer, innovativer Methoden zu, die in der ersten Förderperiode entwickelt worden sind. Diese einzelnen apparativen Methoden sowie das neuartige Potenzial für die Untersuchungen innerhalb der zweiten Förderperiode des Graduiertenkollegs sind im Arbeits- und Ergebnisbericht zusammengestellt.

Um den fachübergreifenden Charakter des Graduiertenkollegs für die Fortsetzungsphase stärker zu verdeutlichen, sind im Folgenden gemeinsame Vorhaben (Kooperationen) der einzelnen Antragsteller gesondert genannt und beschrieben. Die beteiligten Hochschullehrer werden sich in diesem Fall auch die Betreuung der Kollegiaten teilen.

A1 Beller mit A3 Heller und C1 Thurow sowie C2 Stoll

Entwicklung von Eisen- und Kupfer-Katalysatoren für die Selektive Synthese von Aminen und Alkoholen

Der Ersatz von kostenintensiven Edelmetall-Katalysatoren durch ubiquitär verfügbare Eisensysteme ist eines der aktuellen Ziele in der Homogenen Katalyse und nachhaltigen Organischen Synthese. Im Rahmen des Verbundprojektes sollen neue, allgemein verwendbare Eisen- und Kupfer-Katalysatoren für die Hydrierung von Carbonylverbindungen und Iminen entwickelt werden (A1 Beller: Synthese, Katalysatorentwicklung).

Basierend auf kinetischen Studien und detaillierten spektroskopischen on-line Untersuchungen (A3 Heller: Kinetik, Katalysatorentwicklung) werden speziell neuartige Eisen/Amin- und Eisen-Phosphan-Komplexe als Katalysatoren systematisch in diesem Zusammenhang untersucht. Dabei stehen kinetisch-mechanistische Untersuchungen im Fokus der Arbeiten. Neben der Hydrierung selbst (Bestimmung von Teilreaktionsordnungen für das Substrat, den Wasserstoff bzw. den Katalysator) stehen UV/Vis-spektroskopische Methoden (Tauchoptrode sowie stopped flow-Messungen) zur Verfügung. Durch die Einbeziehung weiterer analytischer Daten werden zusätzliche Informationen erhalten (C1 Thurow und C2 Stoll: Prozessanalytik, on-line HRMS).

Auf der Basis der integralen Interpretation aller experimentellen Befunde sollen fundierte Kenntnisse zur Reaktionssequenz ermittelt werden.

A2 Rosenthal und A3 Heller

Verfolgung von Metallorganischen Elementar-Reaktionen mittels UV/Vis-Spektroskopischer Messmethoden wie Tauchoptrode und Stopped Flow-Messungen unter Anaeroben Bedingungen

Vorgesehen ist die Verfolgung von metallorganischen Elementar-Reaktionen der Ethylen-Verknüpfung (gegebenenfalls auch unter Einbeziehung anderer Olefine wie Propylen) zu Metallacyclopentanen an Metallocenkomplexen der frühen Übergangsmetalle mit den innerhalb der ersten Förderperiode aufgebauten UV/Vis-spektroskopischen Messmethoden. Dazu gehören u.a. die Nutzung einer Tauchoptrode (stationäre Methode) oder stopped flow-Messungen (dynamische Methode) unter anaeroben Bedingungen. Dabei erlauben erst die Anwendung von Pseudobedingungen und die damit einhergehende Vereinfachung der Kinetik eine quantitative

Beschreibung der Reaktionssequenzen. Dadurch soll die quantitative Verfolgung obiger Elementar-Reaktionen in Abhängigkeit von den Metallen (Ti, Zr, Hf) im Sinne von Reaktivitätsabstufungen sowie kinetischen Analogien (z. B. Teilreaktionsordnungen) ermöglicht werden. Ein Vergleich der Befunde zu methodisch entsprechenden *in situ* NMR-Versuchen ist vorgesehen. Temperaturabhängige Messungen erlauben eine weitere Modelldiskriminierung.

A2 Rosenthal mit C1 Thurow und C2 Stoll und C3 Brückner
Ligand-Screening für Selektiv-Oligomerisationen von Ethylen mit PNP-Liganden an Chromsystemen zur Optimierung von Prozessparametern

Innerhalb eines Ligand-Screenings für Selektiv-Oligomerisationen von Ethylen sollen mit hochaktuellen PNP-Liganden an Chromsystemen (SASOL-Systeme) bestimmte Prozessparameter (z.B. Ligand zu Cr- und Al zu Cr-Verhältnisse, Lösemittel etc.) hinsichtlich der Bildung von 1-Hexen und 1-Okten mit den innerhalb der ersten Förderperiode aufgebauten HTP-Methoden untersucht und optimiert werden. Ein Vergleich zu den üblichen Autoklavenversuchen ist geplant. Spektroskopische operando-Studien, vorzugsweise mittels EPR/Raman und XAS/Raman-Kopplungen sollen Aussagen zum Einfluss ausgewählter Liganden auf die Struktur des aktiven Zentrums liefern.

C1 Thurow und A1 Beller
Hochauflösende Online-Prozess-Massenspektrometrie für Katalysereaktionen

Die Verfolgung und Identifizierung neuartiger katalytisch-chemischer Reaktionen erfordert in zunehmendem Maße eine detaillierte begleitende Analytik zu verschiedenen Zeitpunkten der Reaktion. Die Entnahme einer Probe mit anschließender Offline-Analyse der genommenen Probe ist heute noch der Standardfall. In diesem Fall erfolgt die messtechnische Untersuchung der Proben offline, eine real time Analyse ist auf diesem Wege nicht möglich.

Der Einsatz einfacher spektroskopischer Messsysteme auf Basis von UV/Vis-Spektroskopie oder Fluoreszenzanalytik liefert i.d.R. nicht die Informationsgehalte, die für eine Strukturaufklärung aller an einer katalytischen Reaktion beteiligten Reaktanden erforderlich sind.

Im Rahmen des Verbundprojektes wird ein System zur Online-Kopplung von Reaktionssystemen an messtechnische Analysensysteme ohne eine chromatographische Vortrennung entwickelt. Wesentlicher Schwerpunkt der Entwicklung ist dabei die flexible Anbindung von hochauflösenden MS-Analysatoren an unterschiedliche Reaktionssysteme wie Batch- oder Contireaktoren. Dabei spielen definierte Probenahmen aus unterschiedlichen Volumina bzw. bei unterschiedlichen Flüssen die zentrale Rolle. Für die Realisierung von Real time Messungen an katalytisch-chemischen Reaktionen ist darüber hinaus eine automatisierte Spektrenserienauswertung von hochauflösenden Massenspektren erforderlich, die die Identifizierung und Strukturaufklärung online ermöglicht. Die Testung des Systems erfolgt an exemplarischen Reaktionen der beteiligten Projektpartner.

C2 Stoll und B1 Börner
Probenahmesystem für Mikroreaktoren

Die Verfolgung von Reaktionen aus dem Bereich der Katalyse erfordert reproduzierbare Entnahmen von Proben zur Analyse aus dem Reaktionssystem. Soll der Einsatz bei kleinen Reaktoren und zusätzlich noch unter höherem Druck erfolgen (z.B. bei Hydrierungen, Carbonylierungen), muss eine möglichst kleine, aber repräsentative Menge entnommen werden.

Es besteht das Ziel, ein entsprechendes Probenahmesystem an unterschiedliche Analysatortypen anzukoppeln, so z.B. GC oder HPLC in Kopplung mit massenspektrometrischer Detektion. Die entwickelten Lösungen sollen sowohl eine quasikontinuierliche Messung - z.B. mit optischen Analysatoren - als auch eine diskontinuierliche Probenahme ermöglichen. Die entnommenen

Proben müssen definiert verdünnt und als Probe für eine chromatographische Analyse oder als Rückstellprobe zur Qualitätssicherung archiviert werden. Das Konzept soll auf einer totvolumenarmen, hochdruckfesten Mikropumpentechnologie aufgebaut und betrieben werden. Für den Betrieb mit unterschiedlichen Lösungsmitteln und Reaktionslösungen sind geeignete Materialien auszuwählen. Die Testung der Gesamtsysteme erfolgt an exemplarischen Reaktionen der beteiligten Projektpartner.

B2 Verevkin und B1 Börner

Homogen Katalysierte Alkoxy- und Hydroxycarbonylierungen von Olefinen und Neue Methoden für die Bestimmung der Polarität von Alkylcarbonate

Organische Carbonate stellen Flüssigkeiten mit höchst interessanten Löslichkeitseigenschaften dar. Aufgrund ihres polaren Charakters mischen sie sich nicht mit unpolaren Verbindungen, wie beispielsweise Kohlenwasserstoffen. Bisherige Untersuchungen der enantioselektive Katalyse in Propylencarbonat haben sehr spezielle Effekte gezeigt. Leider gibt es bisher in der Literatur keine quantitativen Daten zur Charakterisierung derartiger Lösungsmittel. Aus diesem Grunde ist die Bestimmung der Polarität von Alkylcarbonaten anhand einer Reihe von Reaktionen vorgesehen (Zusammenarbeit B2 Verevkin mit B1 Börner). Dabei wird die Entwicklung von thermodynamischen und spektroskopischen Methoden eine wichtige Rolle spielen.

Homogen katalysierte Alkoxy- und Hydroxycarbonylierungen von Olefinen bergen ein enormes Potenzial zur effizienten und ökologisch vorteilhaften Herstellung von Carbonsäuren und Estern für die Bulk- und Feinchemie. Im Vergleich zur verwandten und großtechnisch durchgeführten Rh-katalysierten Hydroformylierung, bei der Aldehyde entstehen und diese zum Zwecke der Carbonsäuresynthese noch aufwändig oxidiert werden müssen, entstehen die wichtigen Carbonsäurederivate hier in einem einzigen Reaktionsschritt. Bisherige Erkenntnisse, bevorzugt aus der Patentliteratur der letzten Jahre, zeigen, dass vor allem Palladiumkatalysatoren geeignet sind. In Anbetracht des großen Preisgefälles zwischen Rhodium und Palladium ist dies eine weitere Motivation, um die beiden eng verwandten Titelreaktionen näher zu untersuchen. Nachhaltige Methoden zeichnen sich auch durch die Wahl von ökologisch vorteilhaften Lösungsmitteln aus, wobei bereits sehr gute Erfahrungen mit dem „grünen“ Lösungsmittel Propylencarbonat gewonnen werden konnten (B1 Börner). Ergebnisse aus der homogenen Hydrierung beweisen, dass insbesondere nachteilige Isomerisierungen von Olefinen durch dieses Lösungsmittel verhindert werden, ein Aspekt der auch bei den geplanten Alkoxy- und Hydroxycarbonylierungen von Bedeutung sein kann.

B1 Börner mit C2 Stoll und C3 Brückner

Innovative Analysenmethoden für Homogen Katalysierte Alkoxy- und Hydroxycarbonylierungen von Olefinen

Homogen katalysierte Alkoxy- und Hydroxycarbonylierungen können sowohl zu linearen als auch zu verzweigten Carbonsäuren bzw. -estern führen. Die letzteren sind zumeist chiral. Eine effektive Methode zu deren enantioselektiven Herstellung wäre insbesondere für die pharmazeutische Forschung von großem Wert. Bisher existieren kaum brauchbare Lösungsvorschläge in der Literatur; die meisten sind auf ausgewählte Substrate beschränkt. Eine wesentliche Ursache liegt in der bisherigen Fokussierung der Forschung auf die Hydroformylierung.

Breite Erfahrungen auf diesem Gebiet (B1 Börner) beweisen, dass eine schnelle Entwicklung effizienter Katalysen vor allem mit Hilfe parallel arbeitender Analysenmethoden möglich ist. Im Allgemeinen erfordert die Verfolgung von Reaktionen aus dem Bereich der Katalyse reproduzierbare Entnahmen von Proben aus dem Reaktionssystem zur Analyse von Edukten, Intermediaten, Produkten und Nebenprodukten (s.a. C2 Stoll).

B3 Kragl und B2 Verevkin***Neue Methoden für die Bestimmung der Polymerisationsenthalpien und Reaktortechnische Untersuchungen in Polyester-Synthesen***

Biokompatible Materialien als Ausgangsstoffe zur Herstellung von Kunststoffen sind von aktuellem Interesse für Wissenschaft und Industrie. Unter anderem sind Polylactide - die Polymere der Milchsäure - interessante Produkte. Polylactide können aus den verschiedensten, nachwachsenden Rohstoffquellen oder gar aus Abfallstoffen anderer Produktionsprozesse, wie beispielsweise der Milchwirtschaft, erzeugt werden. Hierbei wird zunächst durch biotechnologische Prozesse, wie Fermentation aus den natürlichen Ausgangsstoffen, Milchsäure gewonnen. Diese wird dann nachfolgend dimerisiert und aufgereinigt. Es entstehen D- und L-Lactide, aus denen mittels Ringöffnungspolymerisation die Polylactide entstehen. Die resultierenden Polylactid-Homo- und -Copolymere lassen sich zu unterschiedlichen bioabbaubaren oder auch abbauresistenten Halbzeugen und Endprodukten weiterverarbeiten. In diesem Zusammenhang haben vorläufige Untersuchungen gezeigt, dass die Experimente mit Milchsäure-Derivaten wichtig für die weitere Entwicklung von thermodynamischen Methoden sind. Weitere Untersuchungen sollen zur Optimierung der Synthese von Polylactiden beitragen. Hier sollen vor allem enzymkatalysierte Verfahren in Ergänzung zu chemokatalytischen Prozessen untersucht werden. Die erfolgreichen Vorarbeiten zur Synthese der Polyester in wässrig-organischen Zweiphasensystemen sollen sowohl für die Polylactide als auch für neue Kombinationen aus multifunktionalen Carbonsäuren und Polyolen fortgesetzt werden. Durch die *in situ* Extraktion mit verschiedenen Lösungsmitteln können die Eigenschaften der Polymere vor allem im Hinblick auf das Molekulargewicht gesteuert werden. Für die Prozessintensivierung durch *in situ* Extraktion sollen verschiedene Verfahrenstechniken, wie einerseits die klassische Extraktion in einer Blasensäule oder einem Mixer-Settler und andererseits in einem mikrostrukturierten Reaktor untersucht und verglichen werden. Stofftransportvorgänge werden in einer gerührten Lewis-Zelle untersucht und zusammen mit der Kinetik der (bio)katalytischen Reaktion zu einem formalkinetischen Gesamtmodell kombiniert.

B2 Verevkin mit C1 Thurow und C2 Stoll***Neue Methoden für Dampfdruckmessungen, Verbrennungskalorimetrie und Prognosen der Thermodynamischen Eigenschaften von Ökologisch Attraktiven Alternativen Reaktionsmedien***

„Green Solvents“, besonders ionische Flüssigkeiten, besitzen im Vergleich zu traditionellen Lösungsmitteln einen sehr kleinen Dampfdruck. Diese Eigenschaft der alternativen Reaktionsmedien erschwert bestimmte physikalisch-chemische Untersuchungen. So haben zum Beispiel ionische Flüssigkeiten bei Temperaturen über 150°C Dampfdrücke um 0.5 - 2 Pa! Aber gerade daran sind technische Anwendungen von ILs geknüpft. Die verlässliche Bestimmung der niedrigen Dampfdrücke fordert die Entwicklung neuer Methoden. Grundlage hierfür ist eine sehr anspruchsvolle und präzise experimentelle Ausrüstung in Verbindung mit einer guten Vakuumtechnik. Eine geeignete Methode für eine derartige Herausforderung scheint die Quarz-Mikrowaage zu sein. Dabei wird die zu untersuchende Substanz aus einer Messzelle verdampft und auf die Oberfläche von Quarz-Kristallen als ein sehr dünner Film kondensiert. Durch die Verwendung eines sehr hohen Vakuums (10^{-10} mbar) ist es möglich, sowohl thermisch instabile (z.B. Aminosäuren) als auch sehr hochsiedende Substanzen (Carbonate, Ionische Flüssigkeiten) zu untersuchen. Der Aufbau und die Automatisierung einer derart komplexen Hochvakuum-Apparatur erfolgt im Institut für Automatisierungstechnik.

Ionische Flüssigkeiten sind im Vergleich zu traditionellen Lösungsmitteln schwer entflammbar und wenig brennbar (besonders ionische Flüssigkeiten). Bildungsenthalpien von ionischen Flüssigkeiten sind aber wichtige Eckwerte, die meist durch Verbrennungskalorimetrie gemessen werden. Obwohl die Verbrennungskalorimetrie eine etablierte Methode ist, sind neue Entwicklungen erforderlich, um die vollständige Verbrennung der Probe einer ionischen Flüssigkeit zu erreichen. Ähnliche Probleme sind auch bei Untersuchung organischer Alkylcarbonate und

Polyether zu erwarten. Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Modernisierung und Automatisierung der selbst entwickelten, d.h. „hausgemachten“, Verbrennungskalorimeter um Temperaturstabilität und die Präzision der Temperaturmessung auf ein modernes Niveau zu heben und dadurch Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen zu erhöhen.

B3 Kragl mit C2 Stoll und A1 Beller

Mikroreaktor- oder Fallfilmreaktor-Varianten für schnelle Flüssigphasen-Reaktionen

Mikroreaktoren bieten Vorteile bei Reaktionen mit starker Wärmetönung, bei der Umsetzung von toxischen Substanzen oder bei Reaktionen mit Stofftransportprozessen. Bislang sind in der Technik und der Literatur vor allem Beispiele für die ersten beiden Fälle zu finden, weil hier vor allem Aspekte einer erhöhten Sicherheit im Vordergrund stehen, da die Reaktionen im mikrostrukturierten Reaktor deutlich besser kontrollierbar sind. Dies gilt auch für Stoffübergänge zwischen zwei Phasen, die aufgrund der geringen Abmessungen deutlich schneller ablaufen. Von besonderem Interesse sind hier vor allem Reaktionen mit einem gasförmigen Reaktionspartner, der in der Flüssigphase nur gering löslich ist. In einem Mikrofallfilmreaktor können auf Grund des hohen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses im Vergleich zum begasteten Rührkesselreaktor oder zur Blasensäule um Größenordnungen bessere Gaseintragsraten oder k_{La} -Werte erzielt werden. Kombiniert mit einer schnellen Reaktion in der Flüssigphase steigen in entsprechender Weise die volumetrische Produktivität oder Raum-Zeit-Ausbeute. Für eine Charakterisierung dieser Reaktoren ist eine schnelle Probenahme mit kurzen Taktzeiten notwendig, die auch für eine online-Messung und -Regelung eingesetzt werden soll. Als Reaktion wird die Eisenkatalysierte Oxidation verschiedener Alkane und Alkene mit Luft bzw. Sauerstoff untersucht. In Abstimmung mit anderen Teilprojekten können auch Reduktionen bzw. Hydrierungen mit Wasserstoff untersucht werden. Ebenso kann die Gasfreisetzung in solchen Reaktoren optimiert werden, um z. B. die Hemmung der Reaktion zu vermeiden. Mit thermodynamischen und kinetischen Messungen des Reaktionssystems und der Charakterisierung der Reaktoren sollen auf der Basis eines formalkinetischen Modells Limitierungen auf der Seite der Reaktion einerseits und des Reaktors andererseits identifiziert und Strategien zur Behebung entwickelt werden.

B4 Langer mit B3 Kragl, B1 Börner, C3 Brückner und B2 Verevkin

Neue Katalytische Transformationen in Organischen Carbonaten und Verwandten Innovativen Solvenssystemen

Organische Carbonate (OC), wie z. B. Propylencarbonat (PC), stellen toxikologisch unbedenkliche Lösungsmittel dar. Im Rahmen des vorliegenden Antrags sollen präparativ nützliche katalytische Transformationen unter Nutzung von OC und verwandten innovativen Reaktionsmedien entwickelt werden. Dies umfasst Lewis- und Brönstedt-Säure-katalysierte Cyclisierungen und Kondensationen, Palladium- und Kupfer-katalysierte Kreuzkupplungen und Cyclisierungen, Organokatalyse und Biokatalyse. Dabei sollen vorrangig solche katalytische Reaktionen untersucht werden, die selbst entwickelt wurden oder mit denen bereits Erfahrungen bestehen. Darüber hinaus ist auch der (erstmalige) Einsatz von OC in bekannten katalytischen Transformationen geplant („Benchmarking“). Der Einfluss von OC auf die katalytische Aktivität, Effizienz (Ausbeute), Selektivität und Substratbreite soll dabei im Detail untersucht werden. Organische Carbonate besitzen interessante lösungsvermittelnde Eigenschaften, die für Reaktionen von normalerweise schwerlöslichen Substraten (wie z. B. ungeschützte Kohlenhydrate) gezielt genutzt werden sollen. Im Rahmen des Projektes soll außerdem die Palette der verwendeten OC erweitert und auch der Einsatz von Zweiphasensystemen und Mischungen (u. a. mit Wasser) untersucht werden. Die zu untersuchenden katalytischen Transformationen umfassen

- a) die enantioselektive Kondensation von Silylenolethern und Bis-Silylenolethern mit Aldehyden,
- b) katalytische Diels-Alder- und Hetero-Diels-Alder-Reaktionen,

c) in der AG neu entwickelte Lewis-Säure-katalysierte Transformationen von Bis-Silylenolethern, und

d) Übergangsmetall-katalysierte Reaktionen.

Weiterhin wird der Einfluss von OC auf Lewis-Base-katalysierte Reaktionen, organokatalytische und biokatalytische Reaktionen untersucht. Im Rahmen des Projektes sind vielfältige Kooperationen zwischen den Antragstellern geplant: mit B2 Verevkin (thermodynamische Untersuchungen), C3 Brückner (in situ- und Operando-Spektroskopie), B3 Kragl (Kinetik, Up-Scaling Produktabtrennung, Flüssig-Flüssig-Extraktion, Membranverfahren) und B1 Börner (Ligandenscreening). Unabdingbar dafür ist ein Eigenanteil an der Förderung durch das LIKAT: mit Fischer (Massenspektrometrie), Baumann (*in situ*-NMR Spektroskopie) und Spannberg (Röntgenstrukturanalyse).

C3 Brückner mit A1 Beller und B1 Börner A2 Rosenthal, B1 Börner und B4 Langer

Studium von Übergangsmetall-Komplekatalysatoren mit Gekoppelten Operando-Techniken als Brückenschlag zwischen Homogener und Heterogener Katalyse

Authentische Kenntnisse zum Einfluss der Reaktionsbedingungen auf Struktur und Stabilität von Übergangsmetall-Komplekatalysatoren sind essentiell für das Verständnis ihrer Wirkungsweise und die Aufklärung von Reaktionsmechanismen, können aber nur an arbeitenden Katalysatoren mit spektroskopischen *operando*-Methoden gewonnen werden. Um die Relevanz der Ergebnisse zu erhöhen, sollen verschiedene operando-Methoden am selben Reaktionssystem simultan gekoppelt werden. Bisher sind solche Kopplungen selten und fast ausschließlich auf heterogenkatalytische Gas-Feststoff-Reaktionen beschränkt.

In enger Vernetzung mit anderen Antragstellern (A2 Rosenthal, B1 Börner und B4 Langer) sollen die Simultankopplungen XAS/Raman (an BESSY II in Kooperation mit der BAM), UV-Vis/ATR/Raman und EPR/Raman für das Studium von Pd-, Rh, und Cu-katalysierten Komplekatalysatoren in Hydroxycarbonylierungen von Olefinen sowie Perfluoralkylierungen von Arylhalogeniden unter Verwendung neuartiger organischer Carbonate als Lösungsmittel sowie für das Studium von Cr-Ligand-Komplexen in der Ethylenoligomerisierung adaptiert werden. Komplekatalysatoren in Hydroxyformylierungs- und Aminierungsreaktionen adaptiert werden. Während Raman- und ATR-Spektroskopie Änderungen von Bindungen in den organischen Ligand- und Substratmolekülen detektieren, geben XAS-, EPR und UV-Vis-Spektroskopie Auskunft über Valenz- und Koordinationsänderungen der Pd- und Fe-Zentren, jedoch mit unterschiedlicher Empfindlichkeit. Neben den katalytischen Reaktionen sollen auch die Formierung der Katalysatorkomplexe aus Vorstufen sowie ggf. deren Desaktivierung untersucht werden.

Die Untersuchungen sollen zum einen in homogener Phase durchgeführt werden, um den direkten Bezug zu den Arbeiten der Kooperationspartner (A1 Beller und B1 Börner) herzustellen. Zum anderen sollen die Metallkomplexe in ionischen Flüssigkeiten gelöst und auf geeignete Träger aufgebracht werden. Dies ermöglicht den Brückenschlag zwischen homogener und heterogener Katalyse durch Vergleiche des Reaktionsverhaltens und kann die Grundlage für die Entwicklung von heterogenisierten Homogenkatalysatoren bilden. Im Erfolgsfall stärkt dies den Aspekt der Nachhaltigkeit, da bei heterogener Reaktionsführung energie- und kostenintensive Aufarbeitungsschritte vermieden werden können.