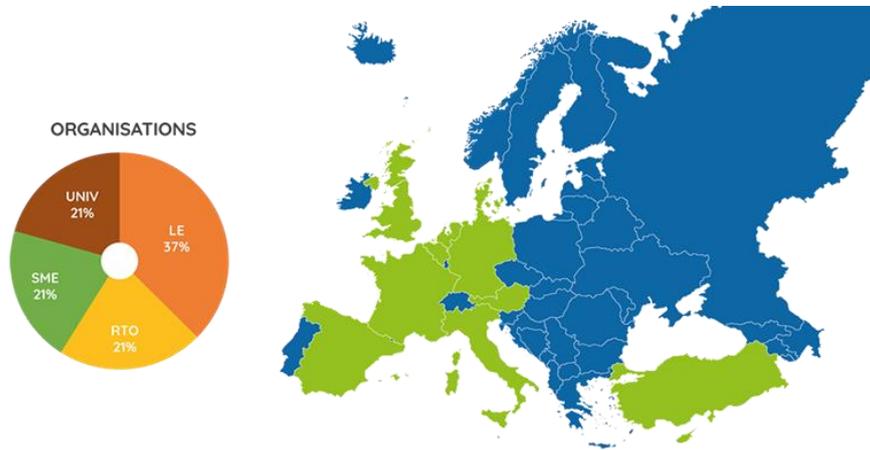


MACBETH IN A NUTSHELL

Dauer: 01. November 2019 – 31. April 2024 (54 Monate)

Projekt Koordinator: Evonik Performance Materials GmbH (EPM)

Beteiligte Geschäftspartner:



In der Prozessindustrie sind nachgelagerte Prozesse die Schritte mit dem höchsten Energie- und Ressourcenverbrauch im industriellen Betrieb. Darüber hinaus erfordert die Integration neuer Prozesse häufig einen großen Teil von CAPEX und OPEX. Um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Prozessindustrie erheblich zu verbessern und zum europäischen Ziel einer sauberen und lebenswerten Umwelt beizutragen, ist ein sehr breit anwendbares Konzept für eine effiziente Integration nachgelagerter Abläufe in die gesamte Prozesskette sehr erwünscht.

Das Konsortium MACBETH (**M**embranes **A**nd **C**atalysts **B**eyond **E**conomic and **T**echnological **H**urdles) bietet eine bahnbrechende Technologie, indem es die katalytische Synthese mit den entsprechenden Trenneinheiten in einem einzigen hocheffizienten katalytischen Membranreaktor (CMR) kombiniert.

Diese disruptive Technologie kann die Treibhausgasemissionen (THG) von großvolumigen industriellen Prozessen um bis zu 35% reduzieren. Zusätzlich wird die Ressourcen- und Energieeffizienz um bis zu 70% gesteigert. Das revolutionäre neue Reaktordesign garantiert nicht nur wesentlich kleinere und sicherere Produktionsanlagen, sondern hat auch einen enormen Wettbewerbsvorteil, da CAPEX um bis zu 50% und OPEX um bis zu 80% gesenkt werden.

Um dies zu erreichen, kombiniert das MACBETH-Konsortium den katalytischen Syntheseschritt mit dem hocheffizienten Trennschritt über eine maßgeschneiderte Membran. Die EU-Vorgängerprojekte **ROMEO*, **BIONICO* und *CARENA* sowie weitere grundlegende Entwicklungen haben eine solide Grundlage geschaffen, indem sie den Proof of Concept für CMRs vorlegten.

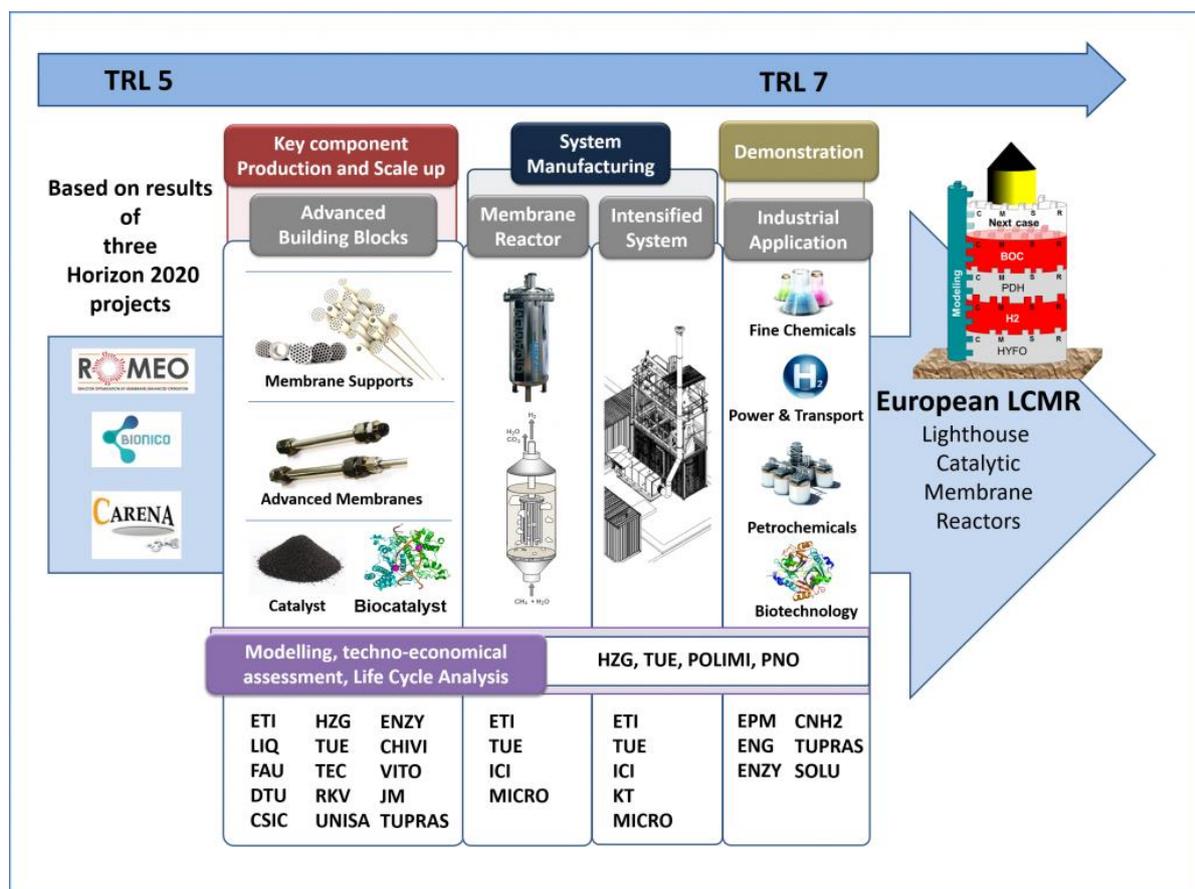
Erfolgreiche Pilotanlagen wurden für hochrelevante und großtechnische Prozesse betrieben: 1. Hydroformylierung (**HYFO*), 2. Wasserstoffproduktion (**H2*) und 3. Propan-Dehydrierung (**PDH*).

Wichtige Mitglieder dieser Konsortien haben sich nun in MACBETH zusammengeschlossen, um CMR auf die nächste Ebene zu bringen und die Grundlage für die weitere Kommerzialisierung der drei neuartigen Technologien zu schaffen. Darüber hinaus bilden die Kenntnisse und Erfahrungen aus den drei erfolgreichen europäischen Projekten die Grundlage für maßgeschneiderte CMR-Lösungen, die

unter nahezu unterschiedlichen Bedingungen in nahezu allen Bereichen der Prozessindustrie, die nach der katalytischen Synthese getrennt werden müssen, breit anwendbar sind.

Um das Nutzungspotential zu demonstrieren, wird MACBETH die CMR-Technologie auf den Bereich der Biotechnologie ausweiten, da bei den meisten biotechnologischen Reaktionen Bakterien oder Enzyme verwendet werden, bei denen es sich um spezielle Katalysatortypen handelt. Auf diesem Gebiet ist die selektive enzymatische Spaltung von Fettsäuren von besonders hohem kommerziellem Interesse. Basierend auf einer Vielzahl bereits etablierter Bausteine (wie Katalysatoren, Membranen, Trägermaterialien und Reaktorkonzepte) wird eine Demo-Anlage für die biokatalytische Ölspaltung (BOC) entwickelt, die zum ersten Mal die kommerzielle Anwendbarkeit von CMR in der Biotechnologie zeigt.

Um einen weiteren Schritt nach vorne zu machen und die Vorteile der CMR-Technologie auf andere Sektoren auszudehnen, wird ein europäisches Kompetenzzentrum eingerichtet. Am Ende des Projekts wird dies zur Gründung der „Lighthouse Catalytic Membrane Reactors“ (LCMR) führen, die auf einem detaillierten Geschäftsplan basiert und das Engagement der Partner einschließt. Dieses Spin-off-Unternehmen bietet Zugang zum kombinierten Wissen des MACBETH-Projekts in Bezug auf alle relevanten Disziplinen wie Bausteine, Modellierung und Systemintegration und wertet die Projektergebnisse durch das strukturierte Angebot kommerzieller Dienstleistungen für interessierte Stakeholder auf.



Das MACBETH-Projekt wurde in 8 Arbeitspakete (WP) strukturiert, die in 54 Monaten umgesetzt werden.

EINIGE HINTERGRUNDINFORMATIONEN

***ROMEO – Reactor Optimization by Membrane Enhanced Operation**

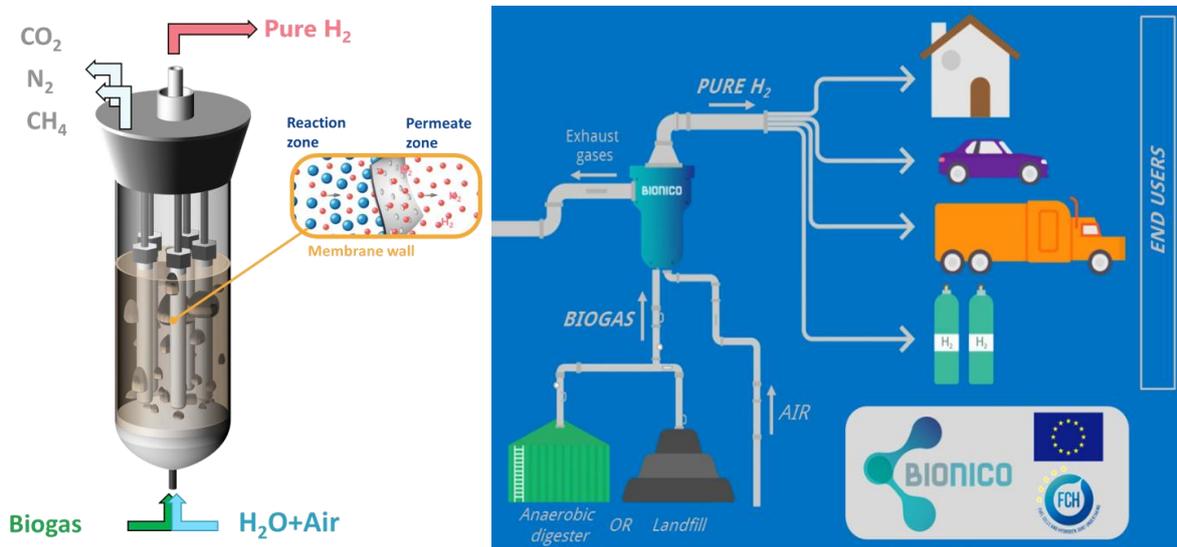
Die „Zwei-in-Eins“-Reaktoren von ROMEO kombinieren optimierte Membranmodule und die Immobilisierung hochaktiver und selektiver homogener Katalysatoren, um die chemische Synthese und die Weiterverarbeitung in einem einzigen Schritt durchzuführen. Als Demonstrationsfälle wurden zwei wichtige Reaktionen im Nano- bis Makromaßstab untersucht: Hydroformylierung (Umwandlung von Olefinen und Synthesegas in Aldehyde) und Wasser-Gas-Shift-Reaktion (Verwendung von CO-haltigem Synthesegas aus Biomasse zur Erzeugung von Wasserstoff).

Mit diesem innovativen Ansatz wird ROMEO:

- die Selektivität und Produktivität industrieller Reaktionen, einschließlich Rohstoffeinsparungen und Katalysatorrecycling verbessern
- den Energieverbrauch um bis zu 80% bei industriellen katalytischen Gasphasenreaktionen und die damit verbundenen Emissionen um bis zu 90% reduzieren

Das ROMEO-Projekt konzentrierte sich auf die Kombination eines homogen katalysierten Reaktionsschritts mit einem Membrantrennungsschritt in einem Reaktor. Zu diesem Zweck wurden homogene Katalysatoren auf Membranen aufgetragen. Das Einbetten homogener Katalysatoren in dünne Filme nichtflüchtiger ionischer Flüssigkeiten (SILP-Technologie) behält ihre katalytischen Fähigkeiten wie in der homogenen Phase bei, während die Verankerung direkt auf oder sogar in der Membran eine äußerst effiziente Trennung gewährleistet.

***BIONICO – BIOgas membrane reformer for deCeNtralized hydrogen produCtiOn**



***CARENA – CAlytic Membrane REactors based on New mAterials for C1-C4 valorisation**

Diese Herausforderungen könnten dank der entsprechenden Prozessintensivierung (PI) und der intelligenten Implementierung katalytischer Membranreaktoren bewältigt werden, was zur

Verringerung der Abhängigkeit der Europäischen Gemeinschaft von importiertem Öl beiträgt. Das CARENA-Projekt wird sich mit den wichtigsten Fragen befassen, die erforderlich sind, um den Weg für die Vermarktung katalytischer Membranreaktoren in der europäischen chemischen Industrie zu ebnen.

****EUROPEAN "Lighthouse Catalytic Membrane Reactors" (LCMR)***

Um über die Demonstration von CMR auf dem Gebiet der Biotechnologie hinauszugehen und ihre herausragenden Vorteile anderen Sektoren und einem noch breiteren Anwendungsbereich zugänglich zu machen, wird ein europäisches Kompetenzzentrum eingerichtet, das am Ende des MACBETH-Projekts zur Gründung eines Spin-off-Unternehmens mit dem vorläufigen Namen „Lighthouse Catalytic Membrane Reactors“ (LCMR), führen wird. Das LCMR bietet Zugang zu dem kombinierten Wissen des MACBETH-Projekts in Bezug auf alle relevanten Disziplinen wie Bausteine, Modellierung und Systemintegration und wertet die Projektergebnisse durch das strukturierte Angebot kommerzieller Dienstleistungen für interessierte Stakeholder auf.

Realisierung von LCMR innerhalb MACBETH

Die vorläufige Idee der Projektpartner besteht darin, die Abspaltung als leichte „Start-up“ - Organisation mit 1_2 Partnern (TUE und POLIMI) zu schaffen, die als Technologieanbieter für die Finanzierung und Verwaltung der Startphase verantwortlich sind, und die anderen Partner tragen dazu bei, die Wissensbasis aufzubauen und das Produkt-/Dienstleistungsportfolio aufzubauen und ihnen eine Bereitschaftsbasis zur Verfügung zu stellen.

Während der ersten 12 Monate des Projekts wird eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, indem weitere Marktforschungen durchgeführt werden, um den potenziellen Markt für diese Modellierungsdienste zu erkunden. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zum IP-Schutz der entwickelten Modellierungssoftware untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein klares und konkretes Geschäftsmodell für eine Abspaltung einschließlich eines Geschäftsplans für die „Lighthouse Catalytic Membrane Reactors“ (LCMR) erstellt. Am Ende des Projekts soll die Abspaltung als europäische Anlaufstelle für Parteien dienen, die daran interessiert sind, die Umweltauswirkungen sowie die Kosteneffizienz ihrer Prozesse mithilfe bahnbrechender CMR zu verbessern.

****BOC – Bio katalytische Ölsplaltung***

Der BOC-Fall in MACBETH zielt darauf ab, ein CMR-basiertes System für die enzymkatalysierte selektive Hydrolyse von Pflanzenölfettsäuren in einem wässrig-organischen System zu etablieren, gefolgt von einer integrierten Membrantrennung zur Isolierung ausgewählter Fettsäuren. Mit dem Wissen und den Erfahrungen der anderen MACBETH-Fälle werden maßgeschneiderte Bausteine für eine zeiteffiziente Übertragung des gesamten Systems auf eine industrielle Pilotanlage entwickelt. Zur Prüfung der Prozessstabilität und Langzeitstabilität des Prozesses in Feldtests werden zwei Projektpartner (ENZY und SOLU) die Pilotanlage testen. Für einen einfachen Transfer zwischen beiden Teststandorten ist eine containerisierte Einrichtung des Systems vorgesehen. Daher wird sowohl die Anpassungsfähigkeit der MACBETH-Ergebnisse an neue Anwendungsbereiche als auch eine lokale Flexibilität des Systems demonstriert.

***HYFO – Hydroformylierung**

Die Hydroformylierung, die Umwandlung von Olefinen und Synthesegas in Aldehyde, ist eine Schlüsselreaktion in der chemischen Industrie zur Herstellung von Spezialchemikalien, die anschließend als Lösungsmittel oder Ressource zur Herstellung von Wasch-, Reinigungs- oder Weichmachern verwendet werden. Basierend auf den Kenntnissen und Ergebnissen der vorherigen Projekte wird sich der Fall HYFO auf die Implementierung und Optimierung bereits etablierter Bausteine und Reaktorsysteme für eine effizientere Hydroformylierungsreaktion konzentrieren. Daher sind folgende Aspekte für die Optimierung von Interesse:

- Stützstruktur zur effizienten Nutzung des Katalysatorsystems: Porenstruktur sowie Trägermaterial
- Katalytisches System für verbesserte Ausbeute und Selektivität: Verhältnisse zwischen ionischer Flüssigphase, Ligand und aktiver Spezies
- Polymermembran für Trennleistung und Durchdringung des Flusses: Polymerzusammensetzung, Beschichtungsverfahren
- Betriebsparameter für einen verbesserten Prozess: Startvorgang, Druck- und Temperaturbereich, Durchsatz

Parallel dazu konzentrieren sich verschiedene Entwicklungsphasen für die Pilotanlage auf infrastrukturelle Änderungen in der Produktionsumgebung, um reale industrielle Bedingungen für die Demo-Phase zu erhalten. Zu diesem Zweck wird der HYFO-Fall an die konventionelle Hydroformulierungs-Produktionsanlage am Evonik-Standort Marl übergeben. Hier wird die Pilotanlage im Recyclingstrom der Anlage (TRL 7) betrieben, eine ideale Position hinsichtlich der Zusammensetzung und des Flusses dieses Stroms, um eine mögliche Implementierung auf einer Brachfläche sowie auf einer grünen Wiese zu einem späteren Zeitpunkt zu simulieren.

***H2 – Wasserstoffproduktion**

Um die Produktion von reinem Wasserstoff aus Biogas oder Erdgas zu verbessern, wird MACBETH ein neuartiges Reaktorkonzept entwickeln, bauen und demonstrieren, dass die Wasserstofftrennung in situ während der Reformierungsreaktion in einem einzigen Gefäß unter industriell relevanten Bedingungen integriert. Hier wird Biogas oder Erdgas Methan bei einer viel niedrigeren Temperatur als bei einem herkömmlichen System in Wasserstoff umgewandelt, was zu einer Steigerung der Gesamtprozesseffizienz und einer starken Verringerung der Volumina und der zusätzlichen Wärmemanagementeinheiten führt. Das neuartige Membranreaktorsystem wird die Anlagenlayouts erheblich vereinfachen, was zu einer Verringerung von CAPEX (viel weniger Komponenten/Reaktoren) und von OPEX (Steigerung des Wirkungsgrads von 59% auf über 70% (für Biogas)) führt. Im Vergleich zu jedem anderen Membranreaktorprojekt in der Vergangenheit (am weitesten fortgeschrittenes TRL 6) wird MACBETH Folgendes demonstrieren:

- Der Membranreaktor läuft in einem viel größeren Maßstab (> 150 Membranen in einem einzelnen Wirbelschichtmembranreaktor)
- Wasserstoffproduktion in kleinem Maßstab, sehr nahe an einer kommerziellen Einheit, ebnet den Weg für eine Marktausnutzung des Reaktorkonzepts
- Das Reaktorsystem wird länger als 8000 Stunden betrieben (für jede der H2-Demo-Anlagen).

Ausgestattet mit einem integrierten fortschrittlichen Steuerungssystem, das die Flexibilität des Systems in Bezug auf die Biogaszusammensetzung verbessert, wird der Reaktor in einer realen

Biogasanlage (H2a) bei ENGIE und in einer Anlage für Erdgas (NG) (H2b) in den CNH2-Anlagen in Puertollano (Spanien) getestet.

****PDH – Propan-Dehydrierung***

Bei Verwendung prozessoptimierter CMRs wird erwartet, dass die rauen Betriebsbedingungen des Propan-Dehydrierungsprozesses gemindert werden (niedrigere Betriebstemperatur), wodurch eine Deaktivierung des Katalysators und damit nachfolgende Regenerierungsschritte vermieden werden, was zu einem verbesserten Prozessmanagement und einer verbesserten Lebensdauer der Anlage/des Katalysators führt. Zusätzlich wird die Selektivität für Propylen erhöht, wodurch das Vorhandensein gasförmiger Nebenprodukte im Prozessstrom drastisch verringert wird. Mit den Ergebnissen der Bausteinoptimierungs- und Modellierungsaktivitäten von MACBETH wird ein intelligentes Design eines PDH-optimierten CMR-Systems erstellt und in einer Demonstrationspilotanlage bei ENGIE in Stains, Frankreich, mit einem kontinuierlichen Langzeitbetrieb implementiert.

Unsere Informationen entsprechen unseren heutigen Kenntnissen und Erfahrungen nach unserem besten Wissen. Wir geben sie jedoch ohne Verbindlichkeit weiter. Unsere Informationen beschreiben weder die Beschaffenheit unserer Produkte und Leistungen noch stellen sie Garantien dar. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von Schutzrechten Dritter. Änderungen im Rahmen des technischen Fortschritts und der betrieblichen Weiterentwicklung bleiben vorbehalten. Der Abnehmer ist von einer sorgfältigen Prüfung der Funktionen bzw. Anwendungsmöglichkeiten der Produkte durch dafür qualifiziertes Personal nicht befreit. Die Erwähnung von Handelsnamen anderer Unternehmen ist keine Empfehlung und schließt die Verwendung anderer gleichartiger Produkte nicht aus.

EVONIK PERFORMANCE MATERIALS GMBH

Business Line Performance Intermediates

C4-chemicals@evonik.com

www.evonik.com/C4chemicals