



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Forschung für nachhaltige
Entwicklungen
BMBF



Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂

Informationsbroschüre zur Fördermaßnahme des Bundesministeriums für
Bildung und Forschung

FORSCHUNG



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂

Informationsbroschüre zur Fördermaßnahme des Bundesministeriums für
Bildung und Forschung

Inhalt

Einleitung	2
Stoffliche CO₂ Nutzung	4
Projektbeispiel 1: Dream Production	6
Projektbeispiel 2: ACER	8
Chemische Energiespeicher	10
Projektbeispiel 1: Integrated Carbon Capture, Conversion and Cycling (iC ⁴)-CO ₂ als Baustein einer effizienten und nachhaltigen Energiespeichertechnologie	12
Projektbeispiel 2: Speicherung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen im Erdgasnetz-Wasser-Elektrolyse und Synthese von Gaskomponenten (SEE)	14
Projektbeispiel 3: Neue Katalysatoren und Technologien für die solarchemische Wasserstoffherzeugung (HyCats)	16
Projektbeispiel 4: Verwertung von CO ₂ als Kohlenstoff-Baustein unter Verwendung überwiegend regenerativer Energie (CO ₂ RRECT)	18
Energieeffiziente Prozesse und Vermeidung von CO₂-Emissionen	20
Projektbeispiel 1: Organophile Nanofiltration für energieeffiziente Prozesse (OPHINA)	23
Projektbeispiel 2: Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz von Produktionsprozessen (InnovA ²)	25
Projektbeispiel 3: Nutzung niederkalorischer industrieller Abwärme mit Sorptionswärmepumpensystemen mittels ionischer Flüssigkeiten und thermochemischer Speicher (SIT)	27

Einleitung

Bisher wird Kohlendioxid (CO₂) in der Öffentlichkeit vorwiegend als „Problemstoff“ im Zusammenhang mit der Erwärmung der Erdatmosphäre wahrgenommen. Dies könnte sich in Zukunft ändern. Es wird weiterhin notwendig sein, CO₂-Emissionen so weit wie möglich zu vermeiden. Die Entwicklung von energieeffizienten und damit CO₂-emissionsarmen industriellen Produktionsverfahren ist somit ein wichtiges Ziel für Industrie und Gesellschaft. Dies gilt insbesondere für energieintensive Wirtschaftszweige wie die chemische Industrie.

Darüber hinaus kann CO₂ aber auch vom Problemstoff zum Wertstoff werden und als chemischer Baustein stofflich genutzt werden. Aus CO₂ lassen sich mit Wasser(stoff) chemische Grundstoffe oder auch Kraftstoffe herstellen, mit komplexeren chemischen Bausteinen als Reaktionspartner werden Kunststoffe und andere Produkte mit hoher Wertschöpfung zugänglich. Dies ist das Ziel der Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Die Fördermaßnahme ist Teil des Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ und widmet sich intensiv dem Themenkomplex „Wiederverwertung von CO₂ durch stoffliche Nutzung“ einerseits und „Vermeidung von CO₂-Emissionen durch mehr Energieeffizienz“ andererseits.

Innovative Forschungs- und Entwicklungsprojekte sollen dazu beitragen, langfristig einen Strukturwandel unserer Industrie und Gesellschaft („weg vom Öl“) einzuleiten. Hierdurch initiiert das BMBF richtungsweisende Forschungsaktivitäten im Spannungsfeld zwischen Klimaschutz und Rohstoffsicherung. Auch zur Energiewende können diese Forschungsvorhaben einen wichtigen Beitrag leisten, kann doch überschüssiger Wind- und Solarstrom genutzt werden, Wasserstoff zu erzeugen und daraus mit CO₂ künstliches Erdgas herzustellen und damit Energie zu speichern.

Die Fördermaßnahme adressiert im Wesentlichen die chemische Industrie mit ihrem hohen Primärenergie- und Materialeinsatz. Zum einen können hier Maßnahmen zur Erhöhung von Effizienzsteigerungen eine besonders große Hebelwirkung entfalten. Zum anderen kann, neben der Biotechnologie, nur die Chemie als stoffwandelnde Industrie die wertschöpfende Nutzung von CO₂ in Produkten erschließen. Die chemische Industrie steht zudem oft am Anfang der

Wertschöpfungsketten und kann daher als Problemlöser vieler Branchen signifikant zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels beitragen.

Die Fördermaßnahme unterstützt Wissenschaft und Wirtschaft darin, gemeinsam innovative Technologien und Verfahren zu entwickeln und langfristig einen wirtschaftlichen Strukturwandel zu realisieren: die Grundlage unserer Wirtschaft – basierend auf Erdöl und Kohle – auf eine andere, nachhaltige Rohstoffbasis unter Verwendung erneuerbarer und alternativer Rohstoffe umzustellen. Diese Fördermaßnahme ist in ihrem Ansatz und Umfang in Europa die größte Initiative zur stofflichen Nutzung von CO₂. Deutschland ist somit Wegbereiter auf dem Weg für eine Verwertung von CO₂ als Chemierohstoff.

Das BMBF fördert hierzu 33 Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit ca. 100 Mio. € über den Zeitraum 2010 bis 2016. Diese Vorhaben wurden aus 89 Vorschlägen ausgewählt. Insgesamt sind 86 industrielle Partner an der Bearbeitung der Vorhaben beteiligt, davon 23 kleine und mittlere Unternehmen. Weitere 71 Projektpartner kommen aus Forschungseinrichtungen und Hochschulen.

Was wird gefördert?

Das BMBF unterstützt 33 Verbundprojekte zwischen Wirtschaft und Wissenschaft zu den Themenfeldern

- **Änderung bzw. Erweiterung der Rohstoffbasis durch die Nutzung von CO₂ als Baustein für die Herstellung von Basischemikalien**
- **Stoffliche Nutzung von CO₂ für die chemische Energiespeicherung**
- **Chemische Aktivierung von CO₂**
- **Innovationen in der CO₂-Abtrennung, z.B. aus Kraftwerksabgasen**
- **Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen in Produktionsprozessen durch Erhöhung der Energieeffizienz und den Einsatz funktionaler Lösungsmittel**



Stoffliche CO₂ Nutzung

Kohlendioxid – Klimagas oder Rohstoff?

Kohlendioxid – CO₂ – ist ein Abfallprodukt, das aus Kohlekraftwerken oder allgemein bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe ausgestoßen und maßgeblich für den Klimawandel verantwortlich gemacht wird. Über 30 Milliarden Tonnen des Klimagases werden weltweit jedes Jahr emittiert.

Chemiker untersuchen die Möglichkeit, das klimaschädliche Gas wieder als Rohstoff zu verwenden, d.h. als chemischer Baustein für die Herstellung von Kunststoffen oder weiterer hochwertiger Produkte. CO₂ wird hierbei als ein Kohlenstoffbaustein angesehen, der fossile Kohlenstoffquellen wie Erdöl oder Erdgas zumindest teilweise ersetzen könnte. Die chemische Industrie ist für die Mehrheit ihrer Produkte auf Kohlenstoff als Basisrohstoff angewiesen. Weltweit stellt die chemische Industrie jährlich über 1 Milliarde Tonnen an kohlenstoffhaltigen chemischen Produkten her: Grundchemikalien, Kunststoffe, Tenside, Farbstoffe, Wasch- und Reinigungsmittel, etc. In Deutschland dominiert der Einsatz von Erdöl als Kohlenstoffquelle, daneben werden auch Erdgas und Kohle eingesetzt. CO₂ fällt in großen Mengen in den Verbrennungsabgasen von Kohlekraftwerken oder anderen Industrieprozessen an und wäre somit eine leicht verfügbare Alternative.

CO₂ als Alternative zum Öl?

Abnehmende Reserven fossiler Rohstoffe und zu erwartende schwierigere Bedingungen der Erschließung von neuen Quellen lassen die Preise für diese Rohstoffe ansteigen und stellen langfristig die Versorgungssicherheit in Frage. Um den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie auch langfristig ökonomisch sinnvoll decken zu können, müssen Alternativen zu fossilen Rohstoffen gefunden werden. Neben Biomasse könnte die stoffliche Nutzung des Klimagases CO₂ eine Lösung darstellen. CO₂ kann u.a. aus Kohlekraftwerken, Zementwerken oder bestimmten Chemieanlagen aus den Abgasen abgetrennt und aufbereitet werden. So kann es der chemischen Industrie als Rohstoff zur Verfügung gestellt werden. Zielprodukte sind u.a. Kunststoffe für die Herstellung von Leichtbauteilen in der Automobilbranche, Matratzen, Polstermöbel, Gehäusematerialien oder Wärmedämmstoffe, aber auch Lösungsmittel oder Feinchemikalien. Somit sehen viele Chemiker CO₂ als einen potenziellen Wertstoff mit

einem breiten Anwendungsprofil. Nachteile von CO₂ sind zum einen seine Reaktionsträgheit und zum anderen sein niedriges energetisches Niveau, das für die Umsetzung mit CO₂ viel Energie erforderlich macht. Im Rahmen der Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“ suchen Wissenschaftler in verschiedenen Projekten (siehe Kästen) nach geeigneten Katalysatoren, die die Reaktionsträgheit des CO₂ überwinden und somit als „Turbo“ für die Umsetzung mit dem Reaktionspartner dienen.

Die in den Projekten beteiligten Ingenieure gestalten die CO₂-basierten Produktionsprozesse so energieeffizient wie möglich. Begleitende Untersuchungen der Stoff- und Energieströme stellen sicher, dass die neuen Prozesse auch wirklich einen günstigen „CO₂-Fußabdruck“ haben, also weniger Energie verbrauchen und damit weniger CO₂ emittieren als die herkömmlichen Produktionsprozesse. Dass im Prozess CO₂ als Rohstoff eingesetzt und in das Zielprodukt eingebaut wird, ist ein wichtiger Aspekt. In einigen Kunststoffen beträgt der Anteil von CO₂ 40 Gewichtsprozent und mehr am Produkt, entsprechend groß ist die Einsparung fossiler Rohstoffe.



Die Projekte

- **Dream Reactions - Stoffliche CO₂-Verwertung**
Dr. Aurel Wolf, Bayer Technology Services GmbH
E-Mail: aurel.wolf@bayer.com
- **CO₂ als Polymerbaustein**
Dr. Uwe Seemann, BASF SE
E-Mail: uwe.seemann@basf.com
- **Dream Production – Technische Erschließung von CO₂ als Synthesebaustein für Polymere**
Dr. Christoph Gürtler, Bayer MaterialScience AG
E-Mail: christoph.guertler@bayer.com
- **Dream Polymers**
Dr. Christoph Gürtler, Bayer MaterialScience AG
E-Mail: christoph.guertler@bayer.com
- **Neue Organokatalysatoren und kooperative Katalyseverfahren für die stoffliche Nutzung von CO₂ als Synthesebaustein (OrgKoKat)- Nachwuchsgruppe**
Dr. Thomas Werner, Leibniz-Institut für Katalyse e. V.
E-Mail: Thomas.Werner@catalysis.de
- **Entwicklung aktiver und selektiver heterogener Photokatalysatoren für die Reduktion von CO₂ zu C1-Basischemikalien (PhotoKat) – Nachwuchsgruppe**
Dr. Jennifer Strunk, Ruhr-Universität Bochum
E-Mail: jennifer.strunk@techem.rub.de
- **Kombinatorische elektrokatalytische CO₂-Reduktion (ECCO₂) – Nachwuchsgruppe**
Dr. Karl J.J. Mayrhofer, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH
E-Mail: mayrhofer@mpie.de
- **Energieeffiziente Synthese von aliphatischen Aldehyden aus Alkanen und Kohlendioxid: Valeraldehyd aus Butan und CO₂ (Valery)**
Dr. Daniela Kruse, Evonik Industries AG
E-Mail: daniela.kruse@evonik.com
- **Natrium-Acrylat aus CO₂ und Ethen (ACER)**
Dr. Michael Limbach, BASF SE
E-Mail: michael.limbach@basf.com
- **CO₂-basierte Acetonfermentation (COOBAF)**
Dr. Jörg-Joachim Nitz, Evonik Industries AG
E-Mail: joerg-joachim.nitz@evonik.com
- **Integrierte Dimethylethersynthese aus Methan und CO₂ (DMEexCO₂)**
Dr. Ekkehard Schwab, BASF SE
E-Mail: ekkehard.schwab@basf.com
- **Feste und fluide Produkte aus Gas**
Dr. Dirk Klingler, BASF SE
E-Mail: dirk.klingler@basf.com

Projektbeispiel 1: Dream Production

1. Herausforderungen und Ziele

Ein Abfallprodukt, das dem Klima schadet – so wird Kohlendioxid bisher wahrgenommen. Doch Bayer will das Treibhausgas gemeinsam mit den Partnern von RWE und der RWTH Aachen als nützlichen Rohstoff einsetzen und in hochwertige Kunststoffe verwandeln. Im Fokus steht Polyurethan, das in vielen Alltagsdingen wie Polstermöbeln, Sportartikeln oder Autoteilen verwendet wird. Ziel ist, den knappen Rohstoff Erdöl zu schonen und den Ausstoß von Kohlendioxid zu vermeiden. Beides wird im Rahmen einer sogenannten Lebenszyklusanalyse überprüft. Erste Produkte auf Basis von CO₂ sollen im Erfolgsfall ab 2015 auf den Markt kommen.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Das im Rahmen von Dream Production eingesetzte Kohlendioxid stammt aus einem Braunkohlenkraftwerk des am Projekt beteiligten Energieunternehmens RWE in der Nähe von Köln. Dort wird es aus dem Rauchgas abgetrennt, gereinigt, verflüssigt und

abgefüllt. Anschließend stellt Bayer daraus in einer Pilotanlage im nahegelegenen Leverkusen, die seit Anfang 2011 in Betrieb ist, einen wichtigen chemischen Baustein her: die Polyurethan-Komponente Polyol, die normalerweise komplett auf Erdöl basiert. Ein Teil des knappen Öls wird dabei durch CO₂ ersetzt, das ebenfalls das zentrale Element Kohlenstoff enthält.

Aus dem neuartigen, kohlendioxidbasierten Polyether-Polycarbonat-Polyol fertigt Bayer durch Mischung mit einer anderen Substanz (Isocyanat) Proben von Polyurethan-Schaumstoff, der intensiv getestet wird. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend: Das CO₂-haltige Material hat ebenso gute Eigenschaften wie jenes, das auf konventionellem Wege hergestellt wird. Wenn sich das neue Verfahren weiterhin bewährt, will Bayer ab 2015 die industrielle Produktion von Polyolen mit Kohlendioxid starten. Als erstes Endprodukt sollen Matratzen aus CO₂-basiertem Polyurethan auf den Markt kommen. In weiten Teilen der Industrie besteht bereits großes Interesse an dem neuartigen Schaumstoff.



Abbildung 1: Pilotanlage in Leverkusen



Abbildung 2: CO₂-basierter Polyurethanschaum

Möglich wurde das Verfahren, weil Bayer-Forscher einen geeigneten Katalysator fanden und zusammen mit dem CAT Catalytic Center in Aachen, einem weiteren Partner bei Dream Production, weiterentwickelten. Er erlaubt es, das reaktionsträge CO₂ auf effiziente Weise zur Reaktion zu bringen. Das CAT Catalytic Center ist eine Forschungseinrichtung, die von der RWTH Aachen und Bayer gemeinsam getragen wird.



Abbildung 3: Forscher Dr. Christoph Gürtler mit CO₂-basiertem Polyurethanschaum

3. Anwendung, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Das innovative Verfahren ist insgesamt in der Lage, einen Wandel der Rohstoffbasis hin zu alternativen Quellen zu unterstützen. Ein nachhaltiger Beitrag wird dadurch geleistet, dass nicht nur im Kraftwerk, sondern auch bei der sehr energieintensiven Erdölaufbereitung weniger CO₂ freigesetzt wird.

Forscher der RWTH Aachen untersuchen umfassend die Ökobilanz des neuen Verfahrens. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass sie wie erwartet positiv ausfällt. Das heißt, es würde am Ende tatsächlich CO₂ eingespart.

Projektbeispiel 2: ACER

1. Herausforderungen und Ziele

Acrylsäure ist der Hauptbaustein für Natrium-Acrylat, einem wichtigen Grundstoff für Hochleistungspolymere, wie die in Windeln verwendeten Superabsorber. Davon werden weltweit über zwei Millionen Tonnen pro Jahr hergestellt. Acrylsäure ist somit ein Großprodukt der chemischen Industrie. Hergestellt wird Acrylsäure derzeit in einer zwei-stufigen Reaktion aus Propen, das aus Rohbenzin gewonnen wird. Diese somit auf fossilen Rohstoffen (Erdöl) beruhende Technologie wurde über Jahrzehnte optimiert und bildet die Messlatte für ein potentielles Neuverfahren, das im Projekt ACER angestrebt wird.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Seit Januar 2011 arbeiten Forscher des von der BASF unterstützten Catalysis Research Laboratory (CaRLa) und der zur BASF gehörenden hte AG, sowie der Technischen Universität München und der Universität Stuttgart im Projekt ACER (Acrylates ex Renewables) an der Herausforderung, CO₂ in industriellem Maßstab für die Herstellung von Natrium-Acrylat ökonomisch und ökologisch nutzbar zu machen. Hierbei soll CO₂ mit Ethen und einer Base umgesetzt werden. Abbildung 4 zeigt das Reaktionsschema.

Das Projekt ist wissenschaftlich höchst anspruchsvoll, handelt es sich bei der Herstellung von Natrium-Acrylat aus Ethen, CO₂ und einer Base doch um eine sog. „Traumreaktion“. Solch eine Reaktion hat das Potential, bestehende Wertschöpfungsketten (und damit verbunden auch Märkte) umzukrempeln. Leider hat die Natur dem Traum eine große technologische Hürde gesetzt: die Reaktion existierte zum Projektstart noch nicht, die Zweifel waren groß, ob sie überhaupt realisiert werden könnte, und ein potentieller Katalysator, der Ethen und das reaktionsträge Kohlendioxid miteinander „verheiratet“, existierte bislang eben nur in den Träumen der Chemiker in Industrie und Hochschule.

Nach nur einem Jahr intensiver Forschung ist dem Team aus Katalysatorforschern, Theoretischen und Technischen Chemikern nun ein bedeutender Durchbruch gelungen: Erstmals wurde Natrium-Acrylat aus CO₂, Ethylen und einer Base synthetisiert. Somit ist erstmals und in nur einem Jahr gelungen, was bislang als unmöglich galt.

Unterstützt werden die Forscher bei ihrer Suche von den modernen Hochdurchsatzmethoden der hte, deren Technologie-Plattform es ermöglicht, schnell Informationen auf breiter Basis zu ermitteln. „Durch parallele Testung können aus den untersuchten

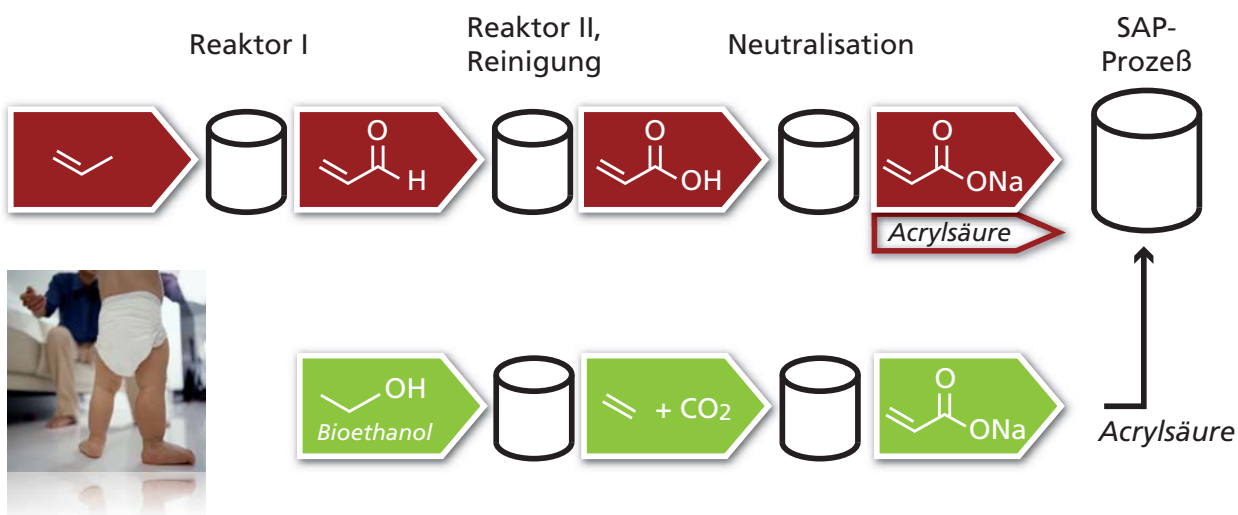


Abbildung 4: Schema des in ACER untersuchten Herstellungsverfahrens für Acrylsäure



Abbildung 5: Anlage zum Katalysatorscreening

Katalysatormaterialien schnell die vielversprechenden Kandidaten identifiziert werden. Für dieses zeitsparende und effektive Verfahren war die hte im Jahr 2011 auch für den Deutschen Zukunftspreis nominiert.

Dadurch wird es früher als geplant möglich, das gefundene Katalysatorsystem zu optimieren, Verfahrensvarianten zu evaluieren und mittels einer kontinuierlich betriebenen Laboranlage auch zu bewerten, quasi der Grundstein für die Verfahrensentwicklung.



Abbildung 6: Autoklavenstation zur Katalysatorprüfung

Mit 2,2 Millionen Euro fördert das BMBF dieses Projekt, BASF und hte stellen zusätzlich über drei Jahre hinweg zusammen nochmals 1,7 Millionen Euro zur Verfügung.

3. Anwendung, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Das im Projekt ACER verfolgte Konzept würde im Erfolgsfall eine vollständige Umstellung der Acrylat-synthese auf nachwachsende Rohstoffe und CO₂ ermöglichen. Ethen, der Reaktionspartner des CO₂ kann aus Bioethanol hergestellt werden.

Chemische Energiespeicher

Die Herausforderungen der Energiewende

Mit dem Beschluss, aus der Kernkraft auszusteigen, setzt die Bundesregierung neben Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz (z.B. durch Wärmedämmung von Gebäuden) insbesondere auf den Ausbau Erneuerbarer Energien. Bis 2020 soll der Anteil aus Erneuerbaren Energiequellen am Stromverbrauch mindestens 35 Prozent betragen. Nach aktuellem Stand liegt er bei 17 Prozent.

Diese Energiewende hat weitreichende Konsequenzen. Windkraft und Photovoltaik sind nicht gleichmäßig verfügbar, sondern unterliegen erheblichen tageszeitlichen, wetterbedingten oder jahreszeitlichen Schwankungen. Die Versorgung von Haushalten und Industrieanlagen mit Strom muss aber auch bei Windstille oder Regenwetter gesichert sein. Umgekehrt muss, wenn der Wind weht, der erzeugte Strom ins Netz eingespeist werden. Eine Situation mit der die Stromnetze nur schwer zurecht kommen.

Schon jetzt müssen Windkraftanlagen in netzschwachen Regionen wegen Netzüberlastung von Zeit zu Zeit durch die Betreiber vom Netz genommen werden,

weil die Transportkapazität nicht ausreicht, um den Strom dorthin zu transportieren, wo er gebraucht wird. Die Zahl der Zwangsabschaltungen von Windparks in Deutschland hat sich in den letzten Jahren mehr als verdreifacht, 2011 gingen so über 400 Gigawattstunden Strom verloren, das entspricht dem jährlichen Strombedarf für 90 Tausend Haushalte.

Chemische Energiespeicher als Ausweg

Gefragt sind Systeme, die Energie speichern, wenn sie entsteht, und bereitstellen, wenn sie gebraucht wird. Große Stromspeicheranlagen wie Pumpspeicherkraftwerke sind vorhanden, deren Kapazitäten sind aber erschöpft. Ein Ausweg bietet die chemische Speicherung von Energie u.a. als synthetisches Methangas. Im Rahmen der Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“ fördert das BMBF strategische Projekte, die dieses Ziel konsequent verfolgen (siehe Kasten).

Die Projekte entwickeln Verfahren, um mit überschüssigem Strom aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen aus dem Klimagas Kohlendioxid Methangas



herzustellen. Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas und ein chemischer Energiespeicher. Es kann in das Erdgasnetz eingespeist und in Erdgasspeichern gelagert werden. Bei Bedarf kann es wieder zur Stromerzeugung eingesetzt, aber auch anderweitig genutzt werden, z.B. zur Heizung von Haushalten, als Kraftstoff in Erdgasfahrzeugen u.s.w.

Das Verfahren hat zwei Stufen. Zunächst wird der Strom verwendet, um aus Wasser durch Elektrolyse Wasserstoff und als Nebenprodukt Sauerstoff herzustellen.

Der gewonnene Wasserstoff wird dann zusammen mit Kohlendioxid in Methangas und Wasser umgewandelt. Das Kohlendioxid kann dabei aus Industrieabgasen, einem Kohlekraftwerk oder einer Biogasanlage stammen.

Die geförderten Projekte haben das Ziel, die beschriebene Produktion von Methangas mit Hilfe von Strom möglichst effizient zu gestalten, d.h. mit möglichst geringen Umwandlungsverlusten.

Die Projekte

- **Integrated Carbon Capture, Conversion and Cycling (iC⁴)**
Prof. Dr. Dr.h.c Bernhard Rieger, Technische Universität München
E-Mail: rieger@tum.de
- **Speicherung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen im Erdgasnetz (SEE)**
Dipl.-Ing. Dominic Buchholz, DVGW-Forschungsstelle
E-Mail: buchholz@dvwg-ebi.de
- **Neue Katalysatoren und Technologien für die solarchemische Wasserstoffherzeugung (HyCats)**
Dr. Sven Albrecht, H.C. Starck GmbH
E-Mail: sven.albrecht@hcstarck.com
- **Verwertung von CO₂ als Kohlenstoff-Baustein unter Verwendung überwiegend regenerativer Energie (CO₂RRECT)**
Dr. Oliver F.-K. Schlüter, Bayer Technology Services
E-Mail: oliver-fk.schlueter@bayer.com
- **Solar-thermochemische Erzeugung chemischer Produkte aus H₂O und CO₂ (Solar STEP)**
Dr. Michael Göbel, BASF SE
E-Mail: michael.goebel@basf.com
- **Herstellung von Kraftstoffen aus CO₂ und H₂O unter Nutzung regenerativer Energie (SunFire)**
Christian von Olshausen, Sunfire GmbH
E-Mail: christian.vonolshausen@sunfire.de

Projektbeispiel 1: Integrated Carbon Capture, Conversion and Cycling (iC⁴)-CO₂ als Baustein einer effizienten und nachhaltigen Energiespeichertechnologie

1. Herausforderungen und Ziele

Ausgerechnet das problematische „Treibhausgas“ Kohlendioxid könnte das Energiespeicherproblem lösen helfen, indem es, bildlich gesehen, als Transportgefäß für die regenerative Primärenergie genutzt wird. Wandelt man es in den Hauptbestandteil des Erdgases Methan um, so könnte man die Infrastruktur und die immensen Speicherkapazitäten der global verfügbaren



Abbildung 7: Pilotreaktor zur Methanisierung (Teilprojekt COOMeth)

Erdgasnetze (chemische Energie) mit der Stromproduktion koppeln. Dadurch ließen sich sogar mehrwöchige Flauten ausgleichen. Das vom BMBF mit 6,3 Mio. Euro geförderte Verbundprojekt „iC⁴: Integrated Carbon Capture, Conversion and Cycling“ nimmt diese Herausforderung an, mit dem Ziel, CO₂ aus verschiedenen Quellen, wie beispielsweise Biogasanlagen, Kraftwerken, der Eisen- oder Zementindustrie, effizient abzutrennen (Carbon Capture), das so gewonnene CO₂ zu Methan oder anderen chemischen Bausteinen wie

Ameisensäure, Methanol, höheren Oxygenaten oder Kohlenwasserstoffen umzusetzen (Conversion) und somit Technologien zur Verfügung zu stellen, um einen weitgehend klimaneutralen Beitrag zur Rückführung von CO₂ in die Energie- und Stoffströme zu leisten (Cycling). Hierzu hat sich ein hochkarätiges, interdisziplinäres Konsortium namhafter Firmen zusammen mit Wissenschaftlern der Technischen Universität München gebildet, welches intensiv an den miteinander verzahnten Einzelprojekten arbeitet.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Ein zentraler und erfolgskritischer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt in der Entwicklung verbesserter, energieoptimierter und wirkungsgradschonender Abtrennungsvorgänge von CO₂ aus Industrie-Emissionen mittels neuartigen, festen als auch flüssigen Sorbentien (iC⁴ Teilprojekt AdCOO) oder innovativen CO₂-selektiven Membranen (iC⁴ Teilprojekt COOMem).

Das so, verglichen mit bestehenden Technologien, ökonomisch und ökologisch effizienter abgetrennte Kohlendioxid soll dann in zwei Kreisläufe rückgeführt werden: Als chemischer Energiespeicher Methan ins Erdgasnetz, um dort bei Bedarf verstromt zu werden oder als Kohlenstoff-Rohstoff zur Veredelung zu Basischemikalien. Im iC⁴ Teilprojekt COOMeth wird die Methanisierung des CO₂ bereits unter industriell relevanten Bedingungen bearbeitet. Der Fokus liegt hier auf der Entwicklung und umfangreichen Testung verbesserter, robuster Katalysatoren in einem geeigneten Reaktorkonzept, welche die Hydrierung von CO₂ zu Methan spezifikationsgerecht und vor allem wirtschaftlich gestalten. Das Ziel ist, eine rasche technische Implementierung der Projektergebnisse zu erreichen, was im Erfolgsfall im Bereich der Energieerzeugung, auf Grund des dann erstmals etablierten Kohlenstoff-Kreislaufes (Cycling), einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten wird.

Die vierte, weiter in die Zukunft blickende Säule des iC⁴-Projektclusters bildet die direkte, photochemische Umsetzung von Kohlendioxid und Wasserstoff zu Wertprodukten (iC⁴ Teilprojekt PhotoCOO). Sonnenlicht als Energiequelle nutzend soll mittels neu entwickelten, photo-katalytisch wirkenden Materialien

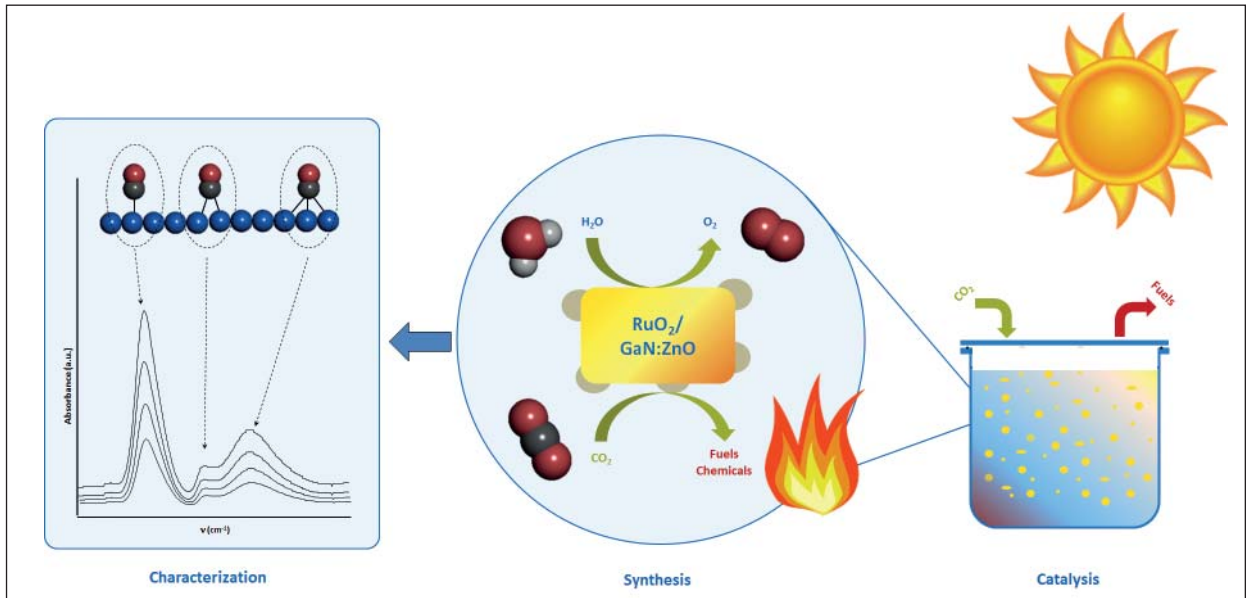


Abbildung 8: Schema zu PhotoCOO - Synthese, Charakterisierung und potentieller Anwendung zur Direktumsetzung von CO_2 zu Chemikalien und Kraftstoffen mittels regenerativem Wasserstoff und Sonnenlicht.

Wasserstoff aus Wasser freigesetzt werden und dieser, im optimalen Fall im selben System, mit CO_2 zur Reaktion gebracht werden.

3. Anwendung, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Unter besten ökologischen und auch vorteilhaften ökonomischen Bedingungen würde vorab emittiertes CO_2 - via Adsorption und chemischer Umsetzung -

wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden. Dabei können zum einen die Energie der Sonne wirkungsvoll genutzt werden und zum anderen der zum überwiegenden Teil vom Menschen verursachte Klimakiller Kohlendioxid nicht nur eingefangen (und gelagert), sondern stofflich und energetisch in Wert gesetzt werden. Dies schützt die Umwelt und dient zudem zwei Wirtschaftssektoren – Energie und Chemie - in perfekter Symbiose.

Projektbeispiel 2: Speicherung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen im Erdgasnetz– Wasser-Elektrolyse und Synthese von Gaskomponenten (SEE)

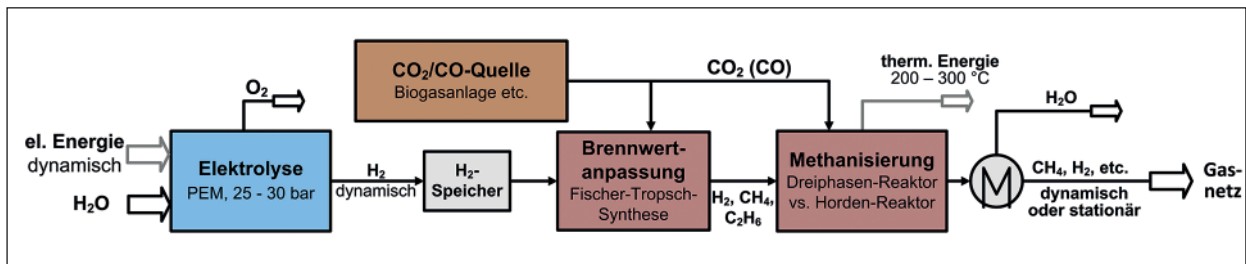


Abbildung 9: PtG (Power to Gas) Prozesskette zur Erzeugung von SNG aus Überschusselektrizität und CO₂

1. Herausforderungen und Ziele

Das Ziel des Verbundprojekts ist die Entwicklung eines Konzepts zur chemischen Speicherung der durch Wind und Photovoltaik fluktuierend anfallenden elektrischen Energie in Form von SNG (Substitute Natural Gas, Erdgasersatzgas). Dabei soll CO₂ als Kohlenstoffquelle dienen.

Die Speicher- und Verteilstruktur für Erdgas ist in Deutschland hervorragend ausgebaut. Riesige Poren- und Kavernenspeicher stehen bereits heute in Deutschland zur Verfügung, weitere Speicher sind in Planung/Bau und werden eine Speicherkapazität zur Verfügung stellen, die etwa dem Achtfachen der 2008 insgesamt durch Windkraft erzeugten elektrischen Energie entspricht.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Wie Abbildung 1 zeigt, untersucht das Projekt alle Schritte der Prozesskette zur Herstellung eines künstlichen Erdgases. In einem Druckelektrolyseur wird zunächst Wasserstoff erzeugt. Vorteil der Wasserelektrolyse unter Druck ist, dass der gebildete Wasserstoff nach der Herstellung schon unter Druck vorliegt und für die weiteren Prozessschritte nicht erst energieintensiv durch einen Kompressor verdichtet werden muss. Kern des Apparats ist eine Polymerelektrolytmembran (PEM), eine mit einem Katalysator beschichtete, für das Gas undurchlässige Membran, die die Erzeugung von Wasserstoff mit hohem Wirkungsgrad ermöglicht. Das Kunststoffgerüst der Membran ist für H⁺ Ionen durchlässig und ist so als sog. Festelektrolyt für die Stromleitung zuständig.

Der gebildete Wasserstoff wird direkt anschließend mit CO₂ umgesetzt zu Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas. Diese sog. Methanisierung erfordert ebenfalls einen Katalysator und erfolgt in speziellen Reaktoren.



Abbildung 10: PEM-Elektrolyseur EL 30 von H-TEC SYSTEMS GmbH

Stand der Technik sind hier sog. Festbett-Reaktoren mit festen Katalysatoren, durch die die gasförmigen Ausgangsstoffe und Produkte strömen. Das Projekt SEE untersucht einen vielversprechenden alternativen Reaktortyp, einen „Slurry“-Reaktor, bei dem die Reaktion zwar ebenfalls an einem festen Katalysator stattfindet. Dieser liegt jedoch feinverteilt in einer Flüssigkeit vor. Durch Bildung von vielen kleinen Gasblasen, einer sog. Blasensäule, wird ein intensiver Kontakt zwischen den gasförmigen Ausgangsstoffen und dem sich in der Flüssigkeit befindenden Katalysator sichergestellt. Durch die Flüssigkeit wird aber auch bei der

Reaktion entstehende Wärme effizient abgeführt, diese würde sonst die Reaktion negativ beeinflussen. Untersucht werden insbesondere sog. Ionische Flüssigkeiten, die eine hohe Wärmekapazität aufweisen und für eine stabile dynamische Betriebsweise, d.h. für Schwankungen in der Zufuhr der Reaktionspartner gut geeignet sind. Aber auch der klassische Festbettreaktor wird weiterentwickelt und insbesondere die Wirtschaftlichkeit bei dessen Anwendung in kleinen und mittleren Anlagen untersucht.



Abbildung 11: Versuchsanlage zur Methanisierung im „Slurry“-Reaktor

Vor der Einspeisung des durch Methanisierung erzeugten Gases in das deutsche Gasnetz muss in der Regel eine Brennwertanpassung an das vorliegende Erdgas erfolgen. Hierzu ist eine Zumischung von höheren Kohlenwasserstoffen, also solchen mit mehr als einem Kohlenstoffatom erforderlich. Bei Biogasanlagen wird dies mit fossilem Flüssiggas erreicht. Die im Projekts SEE entwickelte Prozesskette soll jedoch komplett unabhängig von fossilen Energieträgern sein. Daher werden in einem zusätzlichen Verfahrensschritt, der sog. Fischer-Tropsch-Synthese, Kohlenwasserstoffe mit zwei bis vier Kohlenstoffatomen aus Wasserstoff und CO_2 bzw. Kohlenmonoxid hergestellt, die als hochenergetische Zumischkomponenten für das erzeugte künstliche Erdgas dienen.

Der Herausforderung, eine solche PtG Prozesskette wirtschaftlich und technisch sinnvoll darzustellen, stellt sich ein Konsortium aus Experten verschiedener Bereiche aus Industrie und Forschung: Die H-TEC SYSTEMS GmbH baut einen PEM-Elektrolyseur. Das Fraunhofer ISE untersucht die dynamische Betriebs-

führung mit dem Ziel der Systemoptimierung. Die DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT untersucht die Methanisierung im Slurry-Reaktor und leitet das Projekt. Entwicklung und Synthese der IL erfolgen durch die IOLITEC Ionic Liquids Technologies GmbH. Die Methanisierung im Horden-Reaktor wird durch die Outotec GmbH und die Brennwertanpassung am Engler-Bunte-Institut, Bereich Chemische Energieträger - Brennstofftechnologie des KIT bearbeitet. Die Beachtung der Dynamik des Gesamtsystems erfolgt durch die drei Forschungsinstitute gemeinsam. Als potentieller Anwender untersucht die EnBW Energie Baden-Württemberg AG die Wirtschaftlichkeit und evaluiert mögliche Demonstrationsstandorte.

3. Anwendung, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Durch die Nutzung von ansonsten verlorener elektrischer Energie kann fossiles durch regenerativ erzeugtes Erdgas ersetzt werden. Dies führt zu einer Minderung des effektiven CO_2 -Ausstoßes. Durch Integration der anfallenden Reaktionswärme in die Gesamtprozesskette kann das CO_2 -Minderungspotential weiter erhöht werden.

Neben der Anwendung für die PtG Prozesskette sind die entwickelten Prozesse auch für andere Prozesse von Interesse. So können beispielsweise die im Rahmen des Projektes entwickelten temperaturstabilen ionischen Fluide auch anderweitig eingesetzt werden. Ähnliches gilt für die entwickelten Synthesetechnologien, die z. B. auch bei der thermischen Vergasung von Biomasse Anwendung finden könnten oder für die neuartige Brennwertanpassung mit Fischer-Tropsch Produkten, die für die mittlerweile über 100 deutschen Biogasanlagen mit Einspeisung in das Erdgasnetz interessant sein könnte.

Projektbeispiel 3: Neue Katalysatoren und Technologien für die solarchemische Wasserstofferzeugung (HyCats)

1. Herausforderungen und Ziele

Wasserstoffgas kann in Zukunft als klimafreundliche Alternative zu Erdgas dienen, sofern er aus regenerativen Energiequellen wie z.B. Sonnenenergie hergestellt wird. Bei der solarchemischen Wasserstofferzeugung werden sog. Photokatalysatoren in Wasser eingebracht und durch Bestrahlung mit Sonnenlicht das Wasser in Wasserstoff umgewandelt. So könnte zukünftig Sonnenenergie in Form von Wasserstoff gespeichert werden und eine regenerative Energieversorgung unabhängiger von der jeweiligen Sonneneinstrahlung machen. Da die Effizienz der derzeit bekannten Photokatalysatoren noch deutlich zu gering für einen wirtschaftlichen Einsatz ist, soll das Projekt HyCats hier zu einer Effizienzsteigerung beitragen.

Was ist ein Photokatalysator?

Ein Photokatalysator beschleunigt eine chemische Reaktion unter Nutzung der Energie des Lichts. Er muss dazu Lichtenergie (Photonen) aufnehmen (absorbieren), den (oder die) Reaktionspartner an sich binden und die Energie auf diese(n) übertragen. Die photokatalytische Wasserspaltung in Wasserstoff und Sauerstoff orientiert sich an der natürlichen Photosynthese.

Die erste photokatalytische Wasserspaltung im Labor erfolgte an Titandioxid als katalytischem Material unter Nutzung von UV-Licht. Die aktuelle Forschung sucht nach Photokatalysatoren, die im sichtbaren Spektrum des Lichts arbeiten.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Im Projekt HyCats werden Photokatalysatoren in großer Zahl synthetisiert und auf ihre Aktivität für die solarchemische Wasserstofferzeugung hin getestet. Die Suche nach neuen, verbesserten Photokatalysatoren wird dabei unterstützt durch theoretische Berechnungen sowie durch Untersuchungen, die den Mechanismus der

Photokatalyse aufklären sollen. Für die generierten Photokatalysatoren werden industrielle Produktionsverfahren entwickelt und Solarreaktoren erprobt, um sie effizient für die Wasserspaltung nutzen zu können.

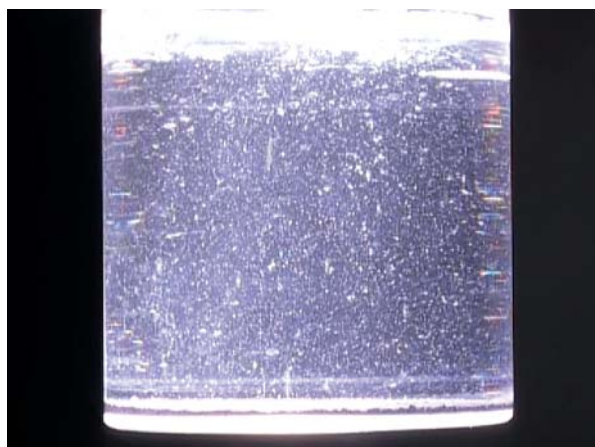


Abbildung 12: Aufsteigende Wasserstoffbläschen in einem Labor-test zur Photokatalyse

3. Anwendungen, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Regenerativ erzeugter Wasserstoff kann in verschiedensten Anwendungen in der Zukunft maßgeblich zum Klimaschutz beitragen, wie z.B. bei der Umsetzung mit CO_2 zu Kohlenwasserstoffen, als Brennstoff zur Hausenergieversorgung oder für Brennstoffzellen in Autos. Die solarchemische Wasserstofferzeugung bietet gegenüber anderen bekannten regenerativen Verfahren prinzipiell den Vorteil einer wesentlich einfacheren Verfahrenstechnologie, da die Wasserspaltung in einem einzigen Reaktor bei niedrigen Temperaturen durchgeführt werden kann. In dezentralen Anwendungen kann dies von Vorteil sein. So können etwa Heizungen oder Brennstoffzellen in Wohnhäusern ideal mit Wasserstoff versorgt werden bei gleichzeitiger Vereinfachung der notwendigen Infrastruktur.

Großtechnisch könnte in industriellen Solarparks Wasserstoff erzeugt werden, der als Alternative zu Erdgas als Energieträger gelagert und transportiert werden kann.



Abbildung 13: Solarreaktor des DLR in Köln

Projektbeispiel 4: Verwertung von CO₂ als Kohlenstoff-Baustein unter Verwendung überwiegend regenerativer Energie (CO₂RRECT)

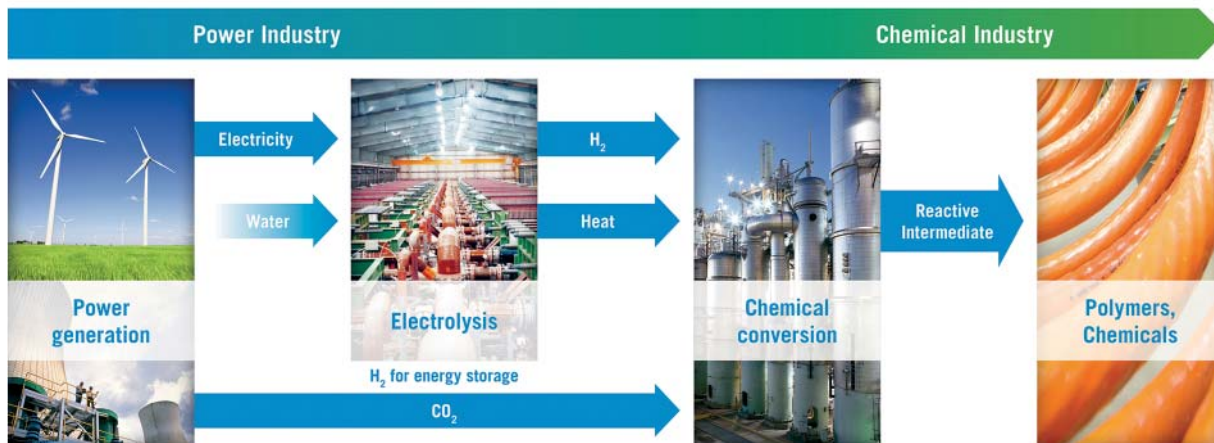


Abbildung 14: Nutzung von CO₂ als Rohstoff für die chemische Industrie über die Umsetzung mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Wertprodukten

1. Herausforderungen und Ziele

Während sich konventionelle Kraftwerke nach der Nachfrage richten, schwankt die Produktion aus alternativen Energiequellen wie Wind und Sonne mit der Wetterlage. Mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien werden zusätzliche Stromspeicher benötigt, um den Bedarf zu regeln. Üblich sind Pumpspeicherkraftwerke oder unterirdische Hohlräume. Aber Strom lässt sich auch anders speichern: chemisch. In Form von Wasserstoff, dessen Energiereichtum sich wiederum nutzen lässt, um aus dem reaktionsträgen Treibhausgas Kohlendioxid wertvolle Basischemikalien zu gewinnen. Eine Forschungsallianz aus Bayer, RWE, Siemens und zehn akademischen Partnern arbeitet an einer neuen Idee: Den Ökostrom nutzen, um damit klimaschädliches Kohlendioxid in nützliche chemische Bausteine zu verwandeln. Ein doppelter Beitrag zur Nachhaltigkeit.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Ebenso wie im Projekt Dream Production stammt das eingesetzte Kohlendioxid aus einem Braunkohlkraftwerk des am Projekt beteiligten Energieunternehmens RWE in der Nähe von Köln. Dort wird es aus dem Rauchgas abgetrennt, verflüssigt und abgefüllt. Der zweite Ausgangsstoff, Wasserstoff, wird mittels einer

in Sekundenbruchteilen an das schwankende Energieangebot anpassbaren Wasserelektrolyse hergestellt, die vom Projektpartner Siemens entwickelt wird.



Abbildung 15: Prototyp des Siemens-Elektrolyseurs mit 0,3 MW Leistungsspitze am RWE-Standort Niederaußem, nahe Köln

Anschließend setzt Bayer den Wasserstoff und das Kraftwerks-CO₂ in einem katalytischen Prozess zu einem reaktionsfähigen Zwischenprodukt um. Das soll in einer Pilotanlage in Leverkusen geschehen, die 2013 in Betrieb geht.

Um das CO₂ zu aktivieren, ist ein spezieller Katalysator nötig. Die Katalyseforschung gehört neben Verfahrens-

technik, Reaktor-Optimierung und der ganzheitlichen Analyse von Prozessen zu den Kompetenzen, die die weiteren Konsortialpartner in das Projekt einbringen. Dazu zählen die Universitäten in Aachen, Bochum, Dortmund, Dresden und Stuttgart sowie die Max-Planck-Gesellschaft, das Leibniz-Institut für Katalyse an der Universität Rostock (LIKAT), das Karlsruher Institut für Technologie und das Forschungszentrum INVITE.



Abbildung 16: Homogenkatalysierte Hydrierung von CO₂ im Miniplantmaßstab

Neben der technischen und wirtschaftlichen Betrachtung findet zudem über die untersuchten Prozessketten hinweg auch eine Bewertung der Reduzierung des Treibhauspotenzials im Vergleich zu heutigen Verfahren statt.

3. Anwendung, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Vorerst ist alles noch eine Vision, die frühestens 2020 Wirklichkeit werden kann. Doch die Planung steht, und die Rollenverteilung ist klar. Derzeit nicht genutzter Windstrom kann einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden, und das üblicherweise als Abfallstoff gehandelte CO₂ dient als von der Erdölindustrie unabhängiger Rohstoff.

Aus dem erzeugtem Zwischenprodukt lässt sich einerseits der Hochleistungs-Kunststoff Polycarbonat produzieren, der beispielsweise für DVDs, LEDs, biegsame Solarmodule oder Brillengläser verwendet wird. Andererseits kann daraus die Chemikalie Isocyanat hergestellt werden – eine wichtige Komponente für Polyurethan-Schaumstoff. Auch dieses Material findet sich in vielen Dingen des täglichen Lebens wie Möbeln, Autos oder Dämmstoffen.

Energieeffiziente Prozesse und Vermeidung von CO₂-Emissionen

Energieeinsparung - der effektivste Weg zur Reduktion von CO₂-Emissionen

Die zuvor beschriebene Verwendung von CO₂ als Rohstoff ist eine Möglichkeit, den Abfallstoff einem Recycling zuzuführen und als Wertstoff wiederzuverwenden. Dem Klimawandel kann man mit dieser Recycling-Strategie jedoch nicht entgegenwirken. Die Menschheit verursacht jährlich über 30 Milliarden Tonnen an CO₂ Emissionen, zwischen 100 und 1.000 mal mehr, als die chemische Industrie als Rohstoff verwerten kann. Die effektivste Strategie zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes ist immer noch – es möglichst gar nicht entstehen zu lassen. Energieeinsparung ist hier der Schlüssel. Schließlich wird ein großer Teil der Energie in Deutschland durch Verbrennung von Kohle oder Gas in Kraftwerken erzeugt, wobei CO₂ in großen Mengen entsteht. Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, den Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um 40 und bis 2050 um mindestens 80 % im Vergleich zu

1990 zu senken. Bis 2050 soll der Bedarf an Primärenergie um 50 % gesenkt werden. Maßnahmen zur Energieeinsparung sind hierzu in allen gesellschaftlichen Bereichen erforderlich. Das betrifft nicht nur die energetische Sanierung von Gebäuden, sondern auch die Industrie, deren Produktionsprozesse und Anlagen so energieeffizient wie möglich werden müssen.

Energieeinsparung in der chemischen Industrie

Die chemische Industrie ist ein sehr energieintensiver Wirtschaftszweig. Global ist die chemische Industrie für 10 % des weltweiten Energieverbrauchs (30 % des industriellen Energieverbrauchs) und 5,5 % der weltweiten CO₂ Emissionen (17 % der industriellen CO₂ Emissionen) verantwortlich. Die Einsparung von Energie und damit verbunden die Reduktion von CO₂ Emissionen ist daher konsequenterweise eine weitere wichtige Komponente der Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische



Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“. Gefördert werden Projekte zur Erhöhung der Energieeffizienz durch verbesserte Verfahrens-, Apparate- und Anlagentechnik in der chemischen Industrie. Hier gibt es vielfältige Einsparmöglichkeiten, entsprechend hoch ist die Vielfalt der geförderten Projekte (siehe Kasten). Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung des Einsatzes

neuartiger Lösungsmittel mit speziellen Eigenschaften zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen. Diese sog. ionischen Flüssigkeiten sind Salze, die bei Raumtemperaturen oder zumindest unter 100 °C in flüssiger Form vorliegen und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten als Hilfsmittel für Synthesen, Aufbereitungs- und Fertigungsverfahren aufweisen.

Die Projekte: Apparate/Anlagen/Verfahren

- **Entwicklung von neuartigen, ressourcen-schonenden Technologien unter Einsatz von Supported Ionic Liquid Phase (SILP) Katalysatoren (Hy-SILP)**
Prof. Dr. Robert Franke, Evonik Industries AG
E-Mail: robert.franke@evonik.com
- **Organophile Nanofiltration für energieeffiziente Prozesse (OPHINA)**
Dr. Christian Schnitzer, Evonik Industries AG
E-Mail: christian.schnitzer@evonik.com
- **Energieeffizienz-Management und Benchmarking für die Prozessindustrie**
Dr. Christian Drumm, Bayer Technology Services GmbH
E-mail: christian.drumm@bayer.com
- **Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz von Produktionsprozessen (InnovA²)**
Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl, Technische Universität Braunschweig
E-Mail s.scholl@tu-braunschweig.de
- **Entwicklung eines miniaturisierten ölfreien CO₂-Kompressors mit integriertem, CO₂-gekühltem Elektromotorantrieb für CO₂-Großwärmepumpen**
Josephine Vega Völk, KSB AG
E-Mail: Josephine.vegavoelk@ksb.com
- **Energieeffiziente Polymerwärmeübertrager**
Prof. Dr. Hans-Joerg Bart, TU Kaiserslautern
E-Mail: bart@mv.uni-kl.de
- **Mixed-Matrix-Membranen für die Gasseparation**
Dipl.-Ing. Torsten Brinkmann Ph. D., Helmholtz-Zentrum Geesthacht
E-Mail: torsten.brinkmann@hzg.de
- **Multiskalenmodellierung von Mehrphasenreaktoren (Multi-Phase)**
Dr. Marc Becker, Evonik Industries AG
E-Mail: marc.becker@evonik.com
- **Integrierte Ressourceneffizienzanalyse zur Reduzierung der Klimabelastung von Produktionsstandorten der chemischen Industrie (InReff)**
Dr. Tobias Viere, ifu Hamburg GmbH
E-Mail: t.viere@ifu.com

Die Projekte: Ionische Flüssigkeiten

- **Nutzung niederkalorischer industrieller Abwärme mit Sorptionswärmepumpen-systemen mittels ionischer Flüssigkeiten und thermochemischer Speicher (SIT)**
Dr. Matthias Seiler, Evonik Industries AG
E-Mail: matthias.seiler@evonik.com
- **Entwicklung IL-basierter Schmierstoffe für Windkraftanlagen (IL Wind)**
Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Universität Erlangen-Nürnberg
E-Mail: wasserscheid@crt.cbi.uni-erlangen.de
- **Neue Absorbentien zur effizienteren CO₂-Abtrennung (EffiCO₂)**
Dipl.-Ing. Alexander Schraven, Evonik Industries AG
E-Mail: alexander.schraven@evonik.com
- **Nutzung von Niedertemperaturwärme durch Absorptionskreisläufe zur Kälteerzeugung und Wärmetransformation - Einsatz von neuartigen Arbeitsstoffpaaren**
Dipl.-Ing. Nina Merkel, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
E-Mail: nina.merkel@kit.edu
- **Verfahren zur Gewinnung von Lignin, Cellulose und Hemicellulose mit Hilfe neuartiger ionischer Flüssigkeiten (Licil)**
Prof. Dr. Willi Kantlehner, Hochschule Aalen
E-Mail: willi.kantlehner@htw-aalen.de

Projektbeispiel 1: Organophile Nanofiltration für energieeffiziente Prozesse (OPHINA)

1. Herausforderungen und Ziele

In vielen Teilen der chemischen Industrie werden in Prozessen Lösungsmittel eingesetzt, die zu einem späteren Zeitpunkt wieder zurückgewonnen werden müssen. Für diese Rückgewinnung werden überwiegend thermische Trennverfahren eingesetzt, die sehr viel Energie meist in Form von Wärme benötigen. Diese Wärme wird in der Prozesstechnik größtenteils aus Dampf und dieser meist aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Durch den Einsatz energieeffizienter Trennprozesse lassen sich daher fossile Brennstoffe und somit CO₂-Emissionen in erheblichem Maße einsparen.

Bei der organophilen Nanofiltration handelt es sich um eine solche Technologie, da sie anders als übliche thermische Trennverfahren ohne den Einsatz von Wärme auskommt. Für die organophile Nanofiltration benötigt man Membranen, die in einer Vielzahl organi-

scher Lösungsmittel stabil sein und gute Trenneigenschaften für das jeweilige Stoffgemisch aufweisen müssen.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Ziel des Projektes OPHINA ist die Erforschung und Erprobung polymerbasierter Membranen, die diesen Ansprüchen genügen. Der Weg zum Ziel führt über Kompositmembranen, die sich aus mehreren Schichten zusammensetzen, von denen jede eine bestimmte Aufgabe hat. Die Materialien für die jeweiligen Schichten wurden im Projekt zum Teil neu synthetisiert, zum Teil konnte auf Bekanntes in abgewandelter Form zurückgegriffen werden. In einem iterativen Entwicklungsansatz wurden die Membranen kontinuierlich sowohl mit Standardtestverfahren als auch in kommerziellen Prozesssystemen auf ihre Leistung überprüft und im nächsten Schritt optimiert oder neue Lösungswege getestet. Gleichzeitig wurde auf der theoretischen



Abbildung 17: Wickelmodul mit Membran für die organophile Nanofiltration

Ebene der Stofftransport durch das komplexe System modelliert, um die Membraneigenschaften besser vorhersagen zu können.

Bei industriellen Anwendungen werden die Membranen in Wickelmodulen (vgl. Foto) eingesetzt. Im Projekt werden die entwickelten Membranen und Membranmodule auf ihre Anwendbarkeit in der organophilen Nanofiltration in verschiedenen Chemieprozessen getestet.

3. Anwendungen, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Im Erfolgsfall lassen sich für einen Trennprozess sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Aufbereitungskosten deutlich reduzieren. Nach erfolgreicher Durchführung des Forschungsprojekts sollen nach weiterer anwendungsbezogener Optimierung die entwickelten Spezialmembranen und -module durch Evonik Industries auf den Markt gebracht werden. OPHINA verfolgt damit zwei Ziele: Auf der einen Seite soll es den Technologiestandort Deutschland stärken, indem Kompetenzen zur Herstellung eines technologisch sehr anspruchsvollen Spezialproduktes entwickelt werden. Auf der anderen Seite soll es der organophilen Nanofiltration neue Anwendungsfelder eröffnen. Die Folge sind kostengünstigere Chemieprozesse, die den Unternehmen Kos-

tenvorteile im Wettbewerb verschaffen und gleichzeitig die Umwelt schonen.

Für die Betreiber von Prozessen mit der organophilen Nanofiltration ergeben sich neben der Reduktion von Aufbereitungskosten und CO₂-Emissionen oft noch zusätzliche Vorteile, zum Beispiel eine bessere Produktreinheit, eine geringere thermische Belastung von Produkten oder bessere Produktqualitäten.



Abbildung 18: Die OPHINA Projektpartner; Beteiligt sind, neben Evonik Industries als Koordinator, die Bayer Technology Services GmbH die Cognis GmbH und die RWTH Aachen.

Projektbeispiel 2: Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz von Produktionsprozessen (InnovA²)

1. Herausforderungen und Ziele

„Jeder will der Erste sein, wenn es darum geht, die zweite Anwendung zu bauen“, so formulierte ein Industrievertreter das Dilemma bei der Markteinführung neuer, innovativer Apparatebauformen. Für neue Bauformen sind noch keine Referenzen zum Einsatz in industriell repräsentativen Prozessen verfügbar, so dass für den Erstanwender ein erhöhtes technologisches und damit auch wirtschaftliches Risiko besteht. Gleichwohl können bisher nicht genutzte Potenziale zur Steigerung der prozessintegrierten Energieeffizienz vielfach erst durch neue Apparatebauformen oder durch eine Verbesserung der Aufwand/Nutzen-Relation, z. B. durch kostengünstigere Fertigungsverfahren der Apparate, erschlossen werden. Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung untersucht daher ein Konsortium aus 17 Partnern, davon 12 Industrieunternehmen und fünf Universitätsinstitute, „Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz von Produktionsprozessen InnovA²“. Dabei sind Vertreter aller an der Wertschöpfungskette beteiligten Partner eingebunden: Apparateanbieter, Anlagenbauer, Ingenieurdienstleister, Anwender bzw. Anlagenbetreiber und Forschungsinstitute.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Einen wesentlichen Beitrag zur erhöhten Energieeffizienz von Produktionsprozessen leistet eine optimale

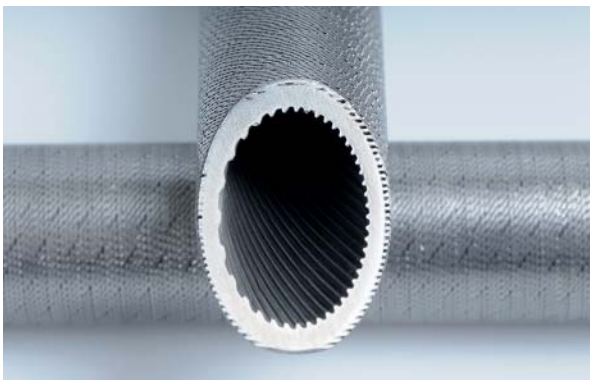


Abbildung 19: Strukturiertes Rohr

Wärmeintegration, d.h. die Nutzung von Abwärme einzelner Prozessschritte zur Deckung des Wärmebedarfs in anderen Prozessschritten. Im Verbundprojekt InnovA² werden drei unterschiedliche neue Apparatekonzepte zur Wärmeintegration untersucht: strukturierte Rohre, sog. Thermoblech-Plattenapparate mit kissenförmigen Plattenpaketen sowie Multistream-Plattenwärmeübertrager.

Zunächst werden in Laboruntersuchungen bei den Universitätspartnern anhand von Modellstoffsyste-men das fluiddynamische und wärmetechnische Betriebsverhalten der Apparate sowie basierend darauf besonders vorteilhafte Einsatzgebiete identifiziert.

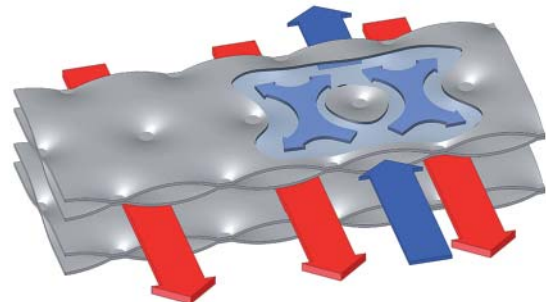


Abbildung 20: Thermoblech-Wärmeübertrager

Die anschließende Übertragung der Laborergebnisse für die reale technische Anwendung wird durch zwei parallele Wege vorbereitet: in Technikumsapparaten wird die geometrische Übertragbarkeit, das sog. Scaleup, der an den Laboranlagen gewonnenen Daten auf technische Apparategrößen überprüft, während in Seitenstromanlagen zu betriebenen Produktionsanlagen die stoffliche Übertragbarkeit durch Einsatz realer Stoffgemische untersucht wird. Dabei können auch Probleme durch verschmutzende Produktkomponenten (Fouling) erkannt und ggf. durch Wahl geeigneter Testsysteme in den Eignungsprüfungen im Labor nachgestellt werden. Basierend auf den Labor- und Technikumsergebnissen werden Dimensionierungsgrundlagen erstellt und in kommerzielle Auslegungsprogramme eingebunden. Dies befördert die spätere Anwendung der erzielten Projektergebnisse in der industriellen Praxis. Zur Identifikation besonders großer Energieeffizienzpotenziale

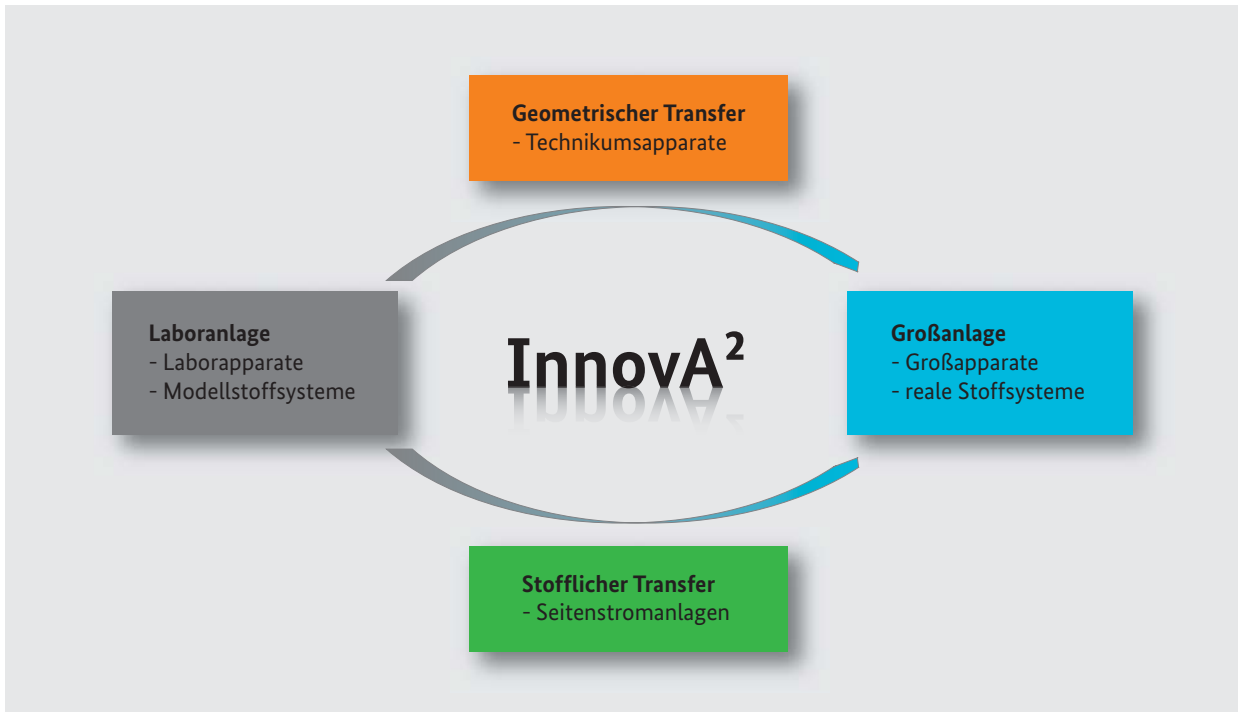


Abbildung 21: Forschungsmethodik InnovA²

sowie zur Quantifizierung des Umweltnutzens werden die apparativen und prozesslichen Maßnahmen durch eine Ökobilanzierung bewertet.

3. Anwendungen, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Die Gestaltung und der Betrieb energieeffizienter Prozesse sind zentrale Ingenieuraufgaben dieser Tage

in allen Bereichen der stoffwandelnden Industrie, wie der petrochemischen, chemischen, pharmazeutischen, papier- oder lebensmittelverarbeitenden Industrie. Das Verbundprojekt InnovA² kann daher einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in allen diesen Branchen leisten. Das Verbundprojekt läuft drei Jahre und wird mit insgesamt 3,8 Mio. Euro gefördert.

Projektbeispiel 3: Nutzung niederkalorischer industrieller Abwärme mit Sorptionswärmepumpensystemen mittels ionischer Flüssigkeiten und thermochemischer Speicher (SIT)

1. Herausforderungen und Ziele

In der Industrie werden kontinuierlich große Abwärmeströme ungenutzt an die Umgebung abgegeben, da sie entweder auf einem zu niedrigem Temperaturniveau oder zu einem Zeitpunkt anfallen, zu dem kein Wärmebedarf besteht. Insbesondere in der chemischen Industrie wurde die Energieeffizienz der Produktionsprozesse in den letzten Jahrzehnten bereits durch Wärmeintegrationsmaßnahmen in Verbundstandorten so weit erhöht, dass eine weitere Verbesserung nur mit Hilfe innovativer Technologien erreicht werden kann.

Weitere Abwärmeströme lassen sich nur nutzen, indem sie mit einer Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau transformiert werden. Mit Hilfe eines chemischen Wärmespeichers mit hoher Speicherdichte ist es möglich, die transformierte Abwärme einzuspeichern und bedarfsgerecht thermische Energie bereitzustellen und somit zur Reduktion von Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen beizutragen.

2. Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Zur Verwertung der niederkalorischen, industriellen Abwärme wird ein Gesamtprozess entwickelt, der auf der Nutzung einer Absorptionswärmepumpe und einem thermochemischen Wärmespeicher beruht.

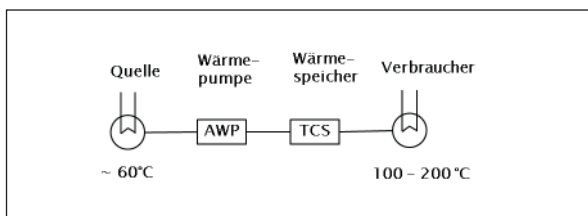


Abbildung 22: Verwertungsszenario niederkalorischer industrieller Abwärme (AWP: Absorptionswärmepumpe; TCS: Thermochemischer Wärmespeicher).

Im Bezug auf die Absorptionswärmepumpe werden neuartige Arbeitspaare, basierend auf Ionischen Flüssigkeiten entwickelt. Durch das Maßschneidern geeigneter Arbeitspaare kann die Gesamtperformance

gesteigert und Vorteile gegenüber den bisher verwendeten konventionellen Arbeitspaaren erzielt werden. Die verfahrenstechnische Überprüfung und Validierung erfolgt sowohl mit Hilfe von Wärmepumpen im Technikumsmaßstab als auch mit kommerziell verfügbaren Wärmepumpen.

In einer Absorptionswärmepumpe wird eine Flüssigkeit von einer anderen absorbiert und später wieder von ihr getrennt. Der absorbierte Stoff (Kältemittel) und der andere Stoff (Lösungsmittel) werden zusammen als Arbeitspaar bezeichnet.



Abbildung 23: Blick in eine Testapparatur zur Validierung neuer Arbeitspaare für Absorptionswärmepumpen

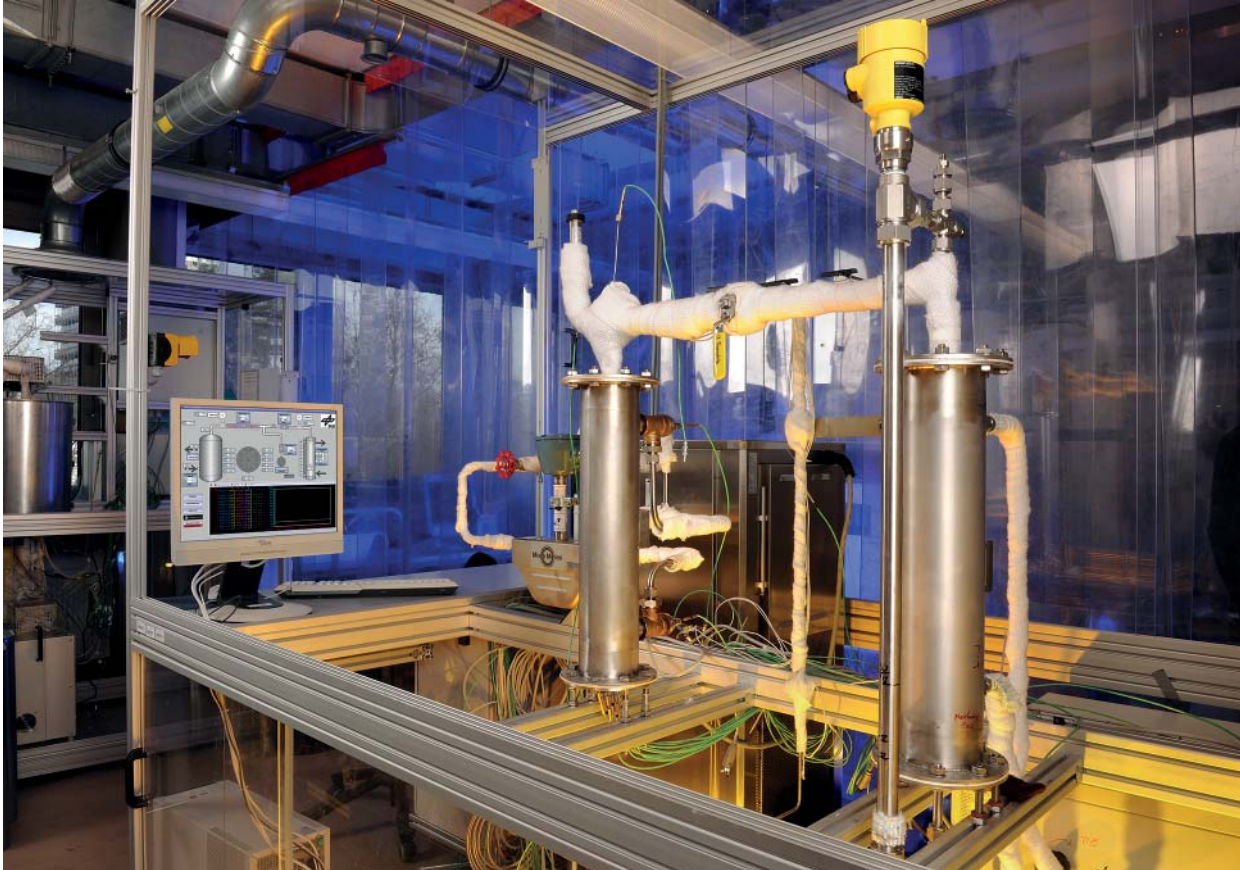


Abbildung 24: Testsystem für thermochemische Wärmespeicher

Für die Entwicklung eines thermochemischen Wärmespeichersystems mit einer hohen Energiespeicherdichte werden einerseits geeignete Reaktionssysteme identifiziert und bewertet. Andererseits wird ein Reaktorkonzept entwickelt, das auf die Anwendung dieser Materialien optimiert und für die Kombination von Wärmepumpe und Wärmespeicher geeignet ist. Der Aufbau eines Wärmespeichers im Technikumsmaßstab bildet die Grundlage für ein späteres Hochskalieren in den kommerziellen Maßstab.

Für das Gesamtkonzept wird eine technoökonomische Bewertung durchgeführt und mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse die Einsparung von Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemission validiert.

3. Anwendungen, Nutzung der Ergebnisse, Ökonomische und ökologische Vorteile

Allein an deutschen Industriestandorten steht jährlich ein Abwärmepotential von über 406 TWh zur Verfügung. Durch die Erschließung dieses Potentials können der Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemission verringert und somit Kosteneinsparungen erzielt werden, die einen Standortvorteil für die deutsche Industrie darstellen und ein nachhaltiges Wachstum in Deutschland sichern.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35 53182 Bonn
oder per Tel.: 01805 - 262 302
Fax: 01805 - 262 303
(0,14 Euro / Min. aus dem deutschen Festnetz)

books@bmbf.bund.de
Internet: www.bmbf.de

Konzept / Redaktion

Projektträger im DLR
DECHEMA e.V.

Gestaltung

Projektträger im DLR

Stand

Mai 2013

Druck

BMBF

Bildnachweis

Abb. 1-3: ©Bayer MaterialScience, Leverkusen, Abb. 4-6:
©Catalysis Research Laboratory, Heidelberg, Abb. 7: ©MAN
DEW, Deggendorf, Abb. 8: ©TU München, Abb. 9: ©DVGW-
Forschungsstelle, Karlsruhe, Abb. 10: ©H-TEC SYSTEMS GmbH,
Abb. 11: ©DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des
Karlsruhe Institute of Technology, Abb. 12: ©H.C. Starck GmbH,
Goslar, Abb. 13: ©DLR e.V., Köln, Abb. 14: ©Bayer Technology
Services, Leverkusen, Abb. 15: ©Siemens AG/RWE Power AG, Abb.
16: ©TU Dortmund, Abb. 17, 18: ©Evonik Industries AG, Marl,
Abb. 19: ©Wieland Thermal Solutions, Ulm, Abb. 20: ©Fa. DEG
Engineering GmbH, Gelsenkirchen, Abb. 21: ©TU Braunschweig,
Abb. 22, 23: ©Evonik Industries AG, Hanau, Abb. 24: ©DLR e.V., Köln

Weitere Bilder

S. 1: ©Thinkstock, S. 4: ©CAT Catalytic Center Aachen, S. 5: ©ars
digital media services (Dariusz T. Oczkowicz), S. 12: ©Fotolia (K.-U.
Häßler), S. 23: ©Fotolia (M. Kaewsang)

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

