



# Zukünftige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoffbasis in der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie

## Eine Roadmap

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

UNI KASSEL | CENTER FOR  
VERSITÄT | ENVIRONMENTAL  
SYSTEMS  
RESEARCH

CO<sub>2</sub>Net+

### **Autoren**

Stefan Bringezu, Simon Kaiser, Sebastian Turnau

### **Herausgeber**

Center for Environmental Systems Research (CESR)  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 47  
34119 Kassel  
www.cesr.de

### **Förderung**

Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Referat 727: Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung  
Dr. Vera Grimm  
Fördermaßnahme: CO<sub>2</sub>Plus – Stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Verbreiterung der Rohstoffbasis  
Förderkennzeichen: 033RC001C

### **Betreuung**

Dr. Stefanie Roth und Dr. Enrico Barsch  
Projektträger Jülich  
Projektträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit

### **Dank**

Folgenden weiteren Personen danken die Autoren für ihre wertvollen Hinweise zur Erstellung dieses Dokumentes:  
Prof. Dr. André Bardow (Lehrstuhl für technische Thermodynamik, RWTH Aachen)  
Dipl.-Ing. Dennis Krämer (Dechema e.V.)  
Dr. Jörg Rothermel (Verband der Chemischen Industrie e. V.)  
Prof. Dr. Michael Röper  
Dr. Thomas Schaub (BASF SE)

Für den Text und etwaige Fehler sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

### **Bildnachweise**

Titel + S. 3 © industrieblick - stock.adobe.com

### **Bezug**

Die Langfassung dieses Dokuments ist online verfügbar. DOI: 10.17170/kobra-202002211019  
Nähere Infos finden Sie außerdem unter: [www.CESR.de](http://www.CESR.de) und [www.chemieundco2.de](http://www.chemieundco2.de)

### **Gestaltung**

PM-GrafikDesign, Peter Mück, Wächtersbach

### **Druck**

Seltersdruck & Verlag Lehn GmbH & Co. KG, Selters

### **Stand**

1. Auflage, März 2020





## Executive Summary

Der Entwurf dieser Roadmap dient als Grundlage für die Diskussion mit und zwischen den beteiligten Akteuren der deutschen Wirtschaft. Dies bezieht nicht nur die chemische Industrie und die kunststoffverarbeitende Industrie ein, sondern auch die Emittenten bzw. möglichen Lieferanten von CO<sub>2</sub> (z. B. Zementproduzenten, MVA-Betreiber) und die Hersteller von Fertigwaren, die Kunststoffe enthalten oder zur Verpackung benötigen, welche künftig mit CO<sub>2</sub> hergestellt werden könnten (z. B. Lebensmittelverpackungen, Fahrzeugteile, Haushaltsgeräte, Bekleidung, medizinische Ausrüstung).

### Motivation und Zielsetzung

Für eine nachhaltige Entwicklung der deutschen Wirtschaft gilt es, sowohl die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren als auch die Effizienz des Rohstoffeinsatzes zu erhöhen und dabei die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Dafür ist zum einen der Umstieg auf eine regenerative Energieversorgung und zum anderen eine verstärkte Kreislaufführung von Stoffen und Materialien erforderlich. Dies bedeutet für die chemische Industrie und die Kunststoffindustrie einen tiefgreifenden Wechsel ihrer Energie- und Rohstoffbasis. Diese beruht bislang weitgehend auf fossilen Energieträgern – insbesondere Erdöl- und Erdgas –, die zugleich als Rohstoffquelle für Kohlenstoff dienen. Ein weitgehender Verzicht auf Kohlenstoff ist nur bei der Energieversorgung möglich, da Kohlenstoff als Materialbasis nicht ersetzt werden kann.

Die Nutzung von CO<sub>2</sub> stellt eine vielversprechende Option zur Verwendung einer nachhaltigen Kohlenstoffquelle dar. Im Rahmen der Begleitforschung der BMBF-Fördermaßnahme CO<sub>2</sub>Plus (Stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Verbreiterung der Rohstoffbasis) wurde eine Roadmap erstellt, welche ausgehend von aktuellen technischen, ökologischen und ökonomischen Einschätzungen die weitere Entwicklung von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Nutzung in der Chemieindustrie skizzieren und mögliche unterstützende Maßnahmen zur Erreichung der Marktreife beschreiben soll.

### Quantifizierung der heutigen und zukünftigen Kohlenstoffflüsse

Die Analyse der Kohlenstoffflüsse durch den Chemie- und Kunststoffsektor über die Nutzung bis hin zum Abfallmanagement ergab, dass es sich aktuell hauptsächlich um einen linearen Durchfluss handelt und nur vereinzelt Kohlenstoffkreisläufe existieren. So werden nur 18 % des Kohlenstoffinputs in das Post-Consumer Abfallmanagement später als Rezyklat wiederverwendet. Die Sekundärinput-(SI-)Rate beschreibt den Anteil der stofflichen Versorgung, der aus Recycling stammt. Diese Rate liegt bei der Chemieindustrie aktuell bei 0,2 % und bei der Kunststoffindustrie bei 9 %. Zum Vergleich: Stahl- und Aluminiumindustrie haben in Deutschland bereits SI-Raten von ca. 50%.

Die wesentlichen Verluste von Kohlenstoff aus dem deutschen Chemie-Kunststoff-Nutzung-Abfall-(CKNA-)System sind mit der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Abfälle und der Emission von CO<sub>2</sub> in die Luft verbunden. Diese umfassen aktuell 39 % des jährlichen Inputs aus primären Quellen, die wiederum zu 91 % fossilen Ursprungs sind. Bei der Nutzung von kohlenstoffhaltigen Produkten, wie z. B. Farben und Lacken oder Wasch- und Reinigungsmitteln, kommt es außerdem zu erheblichen dissipativen Verlusten, welche letztlich infolge von Abbauprozessen auch in Form von CO<sub>2</sub> in die Umwelt entweichen. Eine effektive und umfassende Kreislaufführung von Kohlenstoff ist daher nur möglich, wenn zum einen das werk-

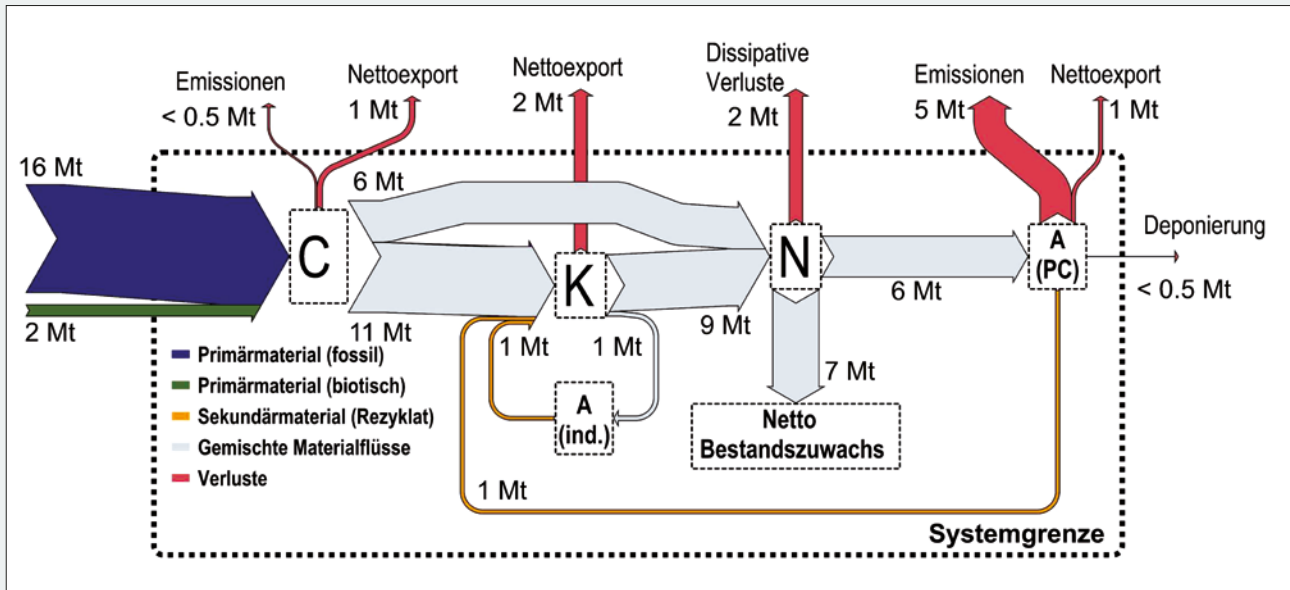


Abbildung 1: Stofflicher Kohlenstofffluss in Deutschland im Jahr 2017 (A = Abfallmanagement, C = Chemiesektor, K = Kunststoffsektor, Ind. = industriell, N = inländische Nutzung, PC = Post Consumer; Mt = Megatonne; Flüsse < 0,1 Mt werden nicht dargestellt)

stoffliche Recycling von Kunststoffprodukten verstärkt und zum anderen CO<sub>2</sub> aus langfristig verfügbaren Quellen abgeschieden und genutzt wird, um die Verluste des CKNA-Systems auszugleichen.

### Status Quo der CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien

Die Nutzung von CO<sub>2</sub> in der Chemieindustrie lässt sich danach unterscheiden, ob das CO<sub>2</sub>-Molekül in bestehenden Prozesse und resultierende Produkte wie Polymere eingebaut wird oder ob es mit Wasserstoff verbunden und zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt wird, die als Basis- oder Spezialchemikalien dienen (mit denen u.a. Kunststoffe hergestellt werden können). Beim Einbau in Polymere können dabei sogar Energieeinsparungen resultieren, wenn energiereiche Zwischenprodukte durch CO<sub>2</sub> ersetzt werden. Bei der Hydrierung von CO<sub>2</sub> wird in jedem Fall zusätzlich Energie benötigt. Der technische Entwicklungsstand der unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien variiert stark. Zum einen gibt es bereits marktfähige Prozesse und Produkte, wie die Herstellung von harnstoffbasierten Harzen, von Polyurethan-Weichschaum oder der Produktion von CO<sub>2</sub>-basiertem Methanol in Island. Zum anderen sind zahlreiche Prozesse noch in der Forschungs- oder Entwicklungsphase. Beispielsweise befinden sich Prozesse der Photokatalyse und elektrochemischen Katalyse aktuell noch im Laborstatus, wohingegen die Synthese von Olefinen aus CO<sub>2</sub>-basiertem Methanol bereits in Pilot- und Demonstrationsanlagen gezeigt wurde.

Die Klimawirkung von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien zur Herstellung von Basischemikalien hängt hauptsächlich von der verwendeten Energiequelle ab. Falls hauptsächlich erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, wird die Klimabelastung im Vergleich zum fossilbasierten Herstellungsprozess reduziert. Gleichzeitig werden zur Bereitstellung der benötigten Energiemenge über die erforderliche Infrastruktur zusätzliche Rohstoffmengen benötigt. Dadurch ist der Rohstoffaufwand von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien höher als bei den fossilen Referenzprozessen. Für die meisten der untersuchten Prozesse ist jedoch die positive Klimawirkung relativ gesehen größer als der höhere Rohstoffaufwand.

Die Produktionskosten der untersuchten CO<sub>2</sub>-basierten Basischemikalien und Polymere liegen aktuell noch deutlich über den Kosten der aktuellen fossilbasierten Prozesse. Verantwortlich für die Mehrkosten sind vor allem die hohen Kosten für Energie, welche teilweise regulativ bedingt sind, sowie die Anlageinvestitionen. Für die Zukunft wird davon ausgegangen, dass die Kosten für die Anlagentechnik aufgrund einer breiteren Anwendung sinken werden. In Kombination mit einer Senkung der Energiekosten könnten die Produktionskosten CO<sub>2</sub>-basierter Basischemikalien und Polymere bereits im Jahr 2030 wettbewerbsfähig sein.

## Zukünftige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffbasis

Die Modellierung verschiedener Szenarien zeigt, dass die deutsche Chemieindustrie bis 2050 rechnerisch auf eine vollständig regenerative Kohlenstoffversorgung (90 % über Recycling inkl. CO<sub>2</sub>-Nutzung, 10 % gleichbleibend biotisch) umgestellt werden könnte. Um dies zu erreichen, würde eine CO<sub>2</sub>-Menge von 49 Millionen Tonnen pro Jahr benötigt. Die in Deutschland emittierten CO<sub>2</sub>-Mengen aus industriellen Punktquellen könnten auch im Jahr 2050 als Kohlenstoffquelle ausreichen, doch dürfte sich als Ergänzung die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Atmosphäre anbieten. Für 2030 wurde den Szenarien entsprechend ein Zielkorridor für die CO<sub>2</sub>-Nachfrage von 3 bis 17 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr berechnet. Deren Nutzung könnte eine SI-Rate für den Chemiesektor von 5 bis 27 % ermöglichen. Der mögliche Zielkorridor für das Jahr 2050 würde eine jährliche CO<sub>2</sub>-Nachfrage von 12 bis 49 Millionen Tonnen erfordern und eine SI-Rate von 27 bis 89 % ermöglichen.

Für die Herstellung von CO<sub>2</sub>-basierten Basischemikalien werden große Mengen erneuerbarer Energie benötigt. Ein Vergleich der benötigten Mengen mit den aktuellen Prognosen der Stromproduktion für die Jahre 2030 und 2050 ergab, dass bei einer breiten industriellen Anwendung von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien zur Herstellung von Basischemikalien im Inland erhebliche Nutzungskonkurrenzen um regenerativ erzeugte Elektrizität zu erwarten wären. Um die SI-Rate der Chemieindustrie um 1 % zu steigern würde nach den Berechnungen zukünftig zwischen 0,7 bis 1,6 % (entsprechend 5 – 6 TWh)<sup>1</sup> der dann in Deutschland verfügbaren Menge an erneuerbarer Elektrizität benötigt. Ein Wechsel der Rohstoffbasis von fossil zu CO<sub>2</sub>-basiert in der deutschen Chemieindustrie erfordert deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit den Import nennenswerter Anteile der CO<sub>2</sub>-basierten Basischemikalien.

## Herausforderungen und Hindernisse

Für die weitere Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien im Chemiesektor konnten im Rahmen von Stakeholderworkshops und einer Onlineumfrage verschiedene Hürden identifiziert werden: Verfügbarkeit von preiswertem erneuerbarem Stroms, die aktuell noch fehlende Wettbewerbsfähigkeit der CO<sub>2</sub>-basierten Prozesse gegenüber den fossil-basierten Prozessen, der frühe Entwicklungsstand und die absehbar kleinere Anlagenauslegung

werden als Haupthemmnisse gesehen. Auch werden hohe Investitionen benötigt, um mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden zu können. Zusätzlich weisen regulatorische Rahmenbedingungen wie die des aktuellen Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) eher Hindernisse als Anreize für die stoffliche Nutzung von Power-to-X (PtX)-Produkten auf.

Für die Herstellung von Chemikalien und Polymeren über einer CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungskette ist es elementar, dass Unternehmen aus unterschiedlichen Sektoren miteinander kooperieren. Die aktuelle Informationslage in den relevanten Industriesektoren über Potenziale von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien und über mögliche Kooperationspartner wurde von den Stakeholdern als unzureichend und ausbaufähig bezeichnet. Dies stellt eine wesentliche Hürde für die Entwicklung und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien dar.

## Maßnahmen zur Förderung der CO<sub>2</sub>-Nutzung

Zur Überwindung der Hürden werden mögliche Maßnahmen vorgestellt, die letztlich nur in kombinierter Form wirksam werden dürften. Diese lassen sich in drei Themenfelder einteilen: informative Maßnahmen, kooperative Maßnahmen sowie regulatorische Maßnahmen. Der Ansatzpunkt der Maßnahmen ist dabei jeweils innovations-, investitions- oder marktorientiert. Sie können auf unterschiedliche Weise der Aktivierung des Marktpotenzials für CO<sub>2</sub>-basierte Produkte auf der Nachfrageseite sowie dem Erreichen einer mittel- bis langfristig wirtschaftlichen Produktion in Deutschland auf der Angebotsseite dienen. Der erstellte Maßnahmenplan sieht vor, dass im ersten Schritt parallel an Innovationen geforscht, Investitionsanreize gesetzt und die Informationslage in relevanten Bereichen verbessert wird. Im nächsten Schritt sollen weitere Maßnahmen von Seiten der Industrie und des Gesetzgebers die Finanzierung und den Aufbau einer CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette fördern. Deren Wettbewerbsfähigkeit kann mit Hilfe von regulatorischen Marktinstrumenten, wie zum Beispiel einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung oder vorgegebenen Quoten für den Sekundärinput, zusätzlich verbessert werden. Der Ausbau von entsprechender Infrastruktur wird mittel- bis langfristig als notwendig angesehen, um CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien eine breite Anwendung zu ermöglichen (Abbildung 2).

<sup>1</sup> Angenommene Nettostromproduktion durch erneuerbare Energien: 374 TWh/a (2030), 777 TWh/a (2050)

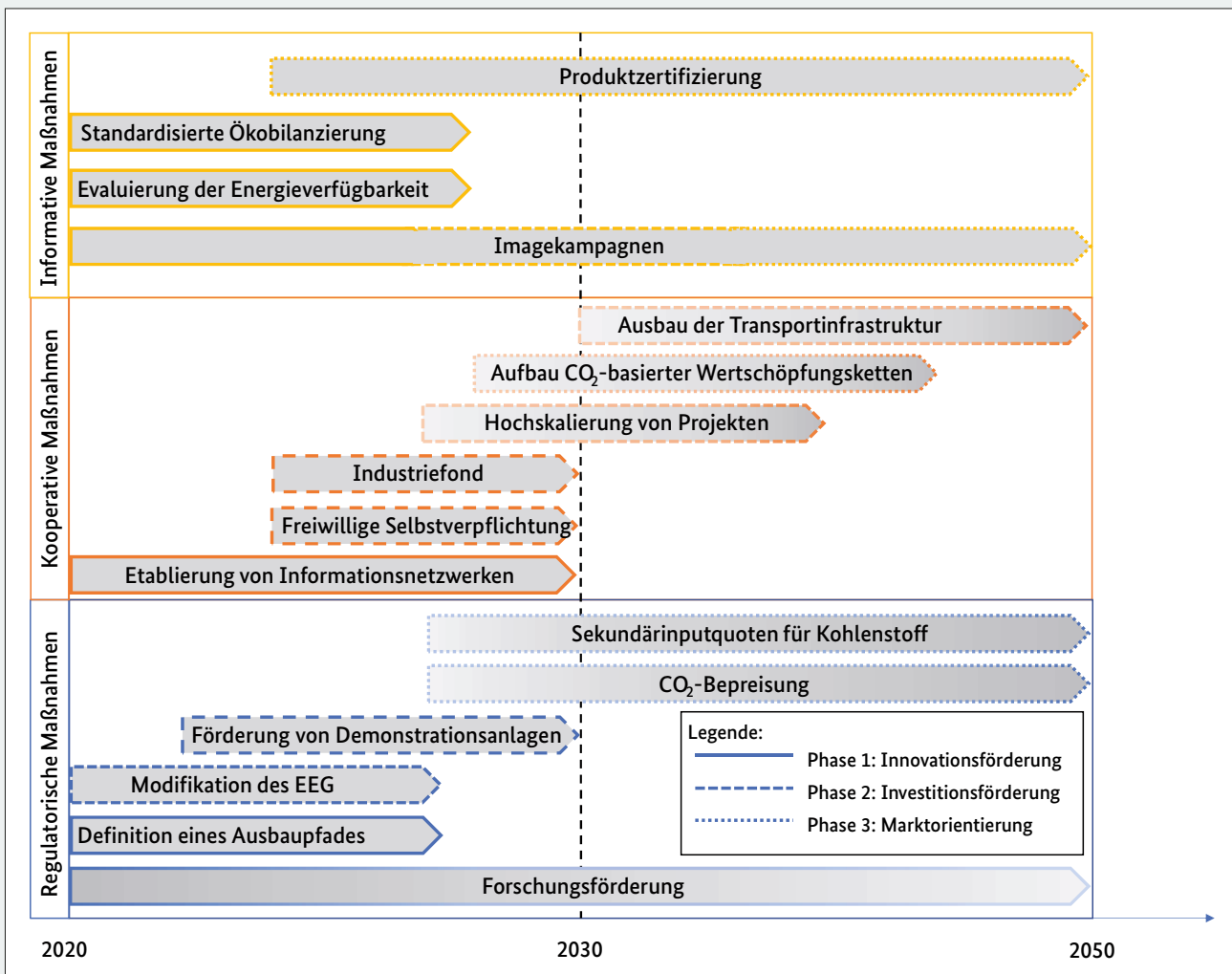


Abbildung 2: Mögliche Maßnahmen zur Förderung der Wettbewerbsfähigkeit von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien im Chemiesektor

## Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle für eine effektive und umfassende Kreislaufführung von stofflich genutztem Kohlenstoff in Chemie- und Kunststoffindustrie unverzichtbar ist. Die CO<sub>2</sub>-Nutzung kann andere Recyclingverfahren dort ergänzen, wo diese nicht anwendbar sind und auf diese Weise zum Beispiel dissipative Verluste während der Nutzungsphase ausgleichen. Damit CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien als nachhaltige Alternative zur fossilbasierten Herstellung von Basischemikalien dienen können, muss weiter in Entwicklung und Anwendung der Technologien investiert und zugleich der institutionelle Rahmen – Information, Kooperation, Regulation – angepasst werden. Dafür bedarf es eines Bündels an Maßnahmen

mit unterschiedlichen Ansatzpunkten und Wirkungsweisen, welche schrittweise eingeführt werden können, um den wettbewerbsfähigen Einsatz von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien in der deutschen Chemieindustrie in den kommenden Jahrzehnten voranzutreiben.

Die beteiligten Kreise sind eingeladen, sich auf der Basis der Informationen des Entwurfs der Roadmap auszutauschen und eigene Vorschläge zu entwickeln über die angestrebten Entwicklungspfade der deutschen chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie, einschließlich eines Zielpfades für die Kreislaufschließung von Kohlenstoff sowie die prioritär und ggfs. zeitlich gestaffelt anzugehenden Maßnahmen zur Förderung von CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien.

---

## **BEZUG**

**Die Langfassung dieses Dokuments ist online verfügbar. DOI: [10.17170/kobra-202002211019](https://doi.org/10.17170/kobra-202002211019)**

**Nähere Infos finden Sie außerdem unter: [www.CESR.de](http://www.CESR.de) und [www.chemieundco2.de](http://www.chemieundco2.de)**

