

# CITplus

7-8

26. Jahrgang · Juli/August · 2023

Das Praxismagazin für **Verfahrens- und Chemieingenieure**

CITplus, das Magazin für die Mitglieder von VDI-GVC und Dechema



## Recycling und Ressourceneffizienz Mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie

### Nachhaltiger Ruß

Verfahrenstechnische  
Recovered-Carbon-  
Black-Produktion **S. 22**

### CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle

Technologien und Markt-  
chancen der CCU **S. 30**

### Phosphorressourcen schonen

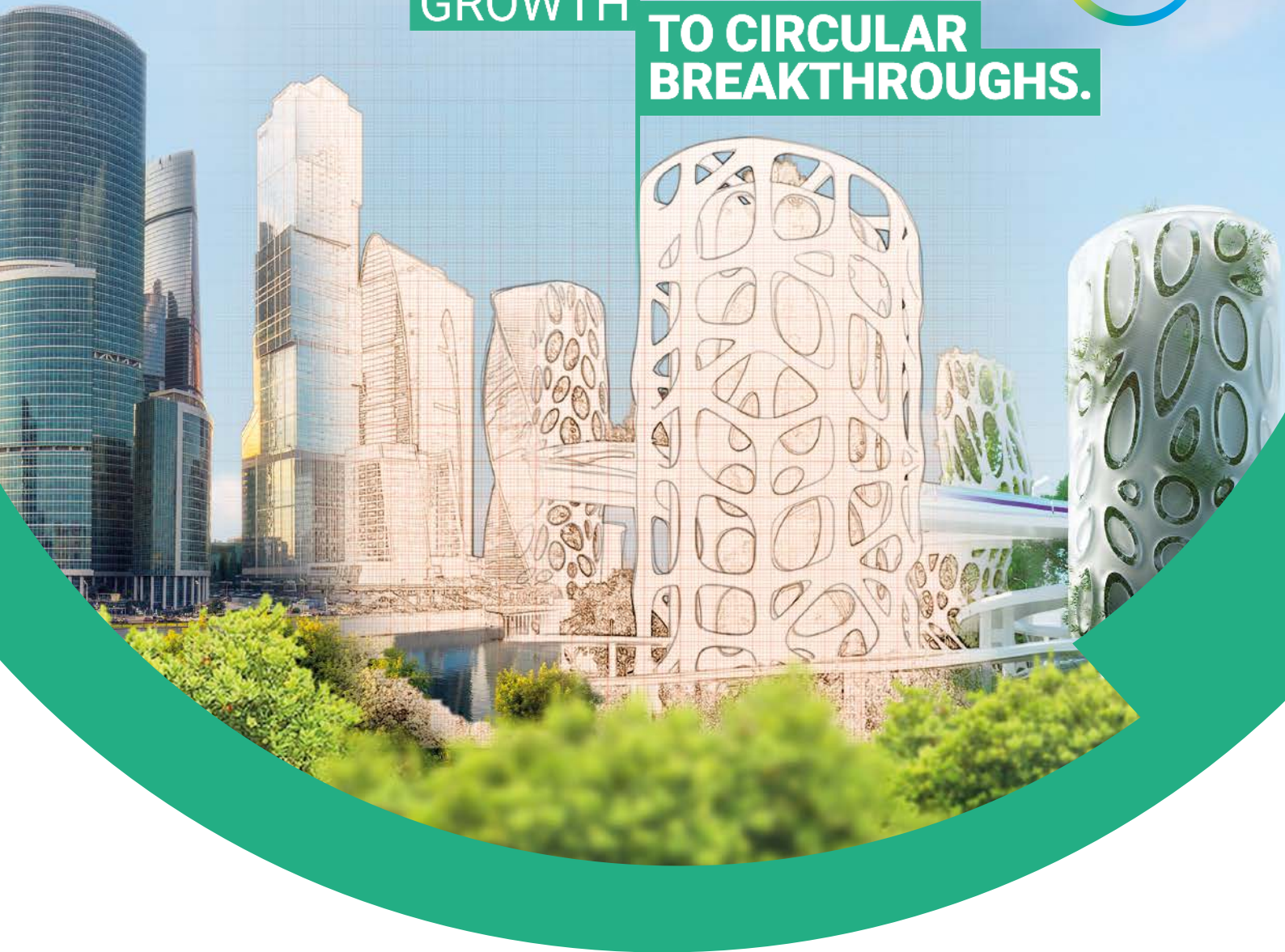
Thermische Klärschlamm-  
verwertung **S. 43**

WILEY  VCH

FROM  
SUSTAINABLE  
GROWTH



TO CIRCULAR  
BREAKTHROUGHS.



## LÖSUNGEN FÜR HEUTE UND VISIONEN FÜR DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT VON MORGEN

### **Den Status quo herausfordern: Was ist ihr STATUS NEXT?**

Von nachhaltigem Wachstum bis zum Durchbruch im Kreislaufsystem: Indem wir alternative Rohstoffe, umweltschonende Energie und wiederverwertbare Materialien nutzen, wollen wir ökologischer Vorreiter in der Beschichtungs- und Klebstoffindustrie werden.





# Let's Play Offense!

Kennen Sie den Ostrich Effect? Als das Vermeiden, sich Informationen auszusetzen, von denen man befürchtet, dass sie psychisches Unbehagen verursachen könnten, definierten Karlsson et al. (2009)<sup>[1]</sup> dieses Phänomen. Im Deutschen wird dies umgangssprachlich als Vogel-Strauß-Verhalten bezeichnet. Das Phänomen greift um sich, wie die aktuelle Untersuchung des Reuters Instituts unter Beteiligung der Universität Oxford<sup>[2]</sup> feststellt. Inzwischen versucht jeder zehnte Erwachsene in Deutschland aktiv Nachrichten zu vermeiden, 65 % versuchen dies zumindest gelegentlich. Dabei sind nur noch 52 % der erwachsenen Internetnutzenden in Deutschland überaus oder sehr an Nachrichten interessiert, 2013 waren es noch 80 % und 2020 immerhin noch 71 %. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass insgesamt 30 % der Befragten Schwierigkeiten haben, Nachrichten über Finanzen und die Wirtschaft zu verstehen, und 28 % es als schwierig erachten, derartige Informationen im persönlichen Alltag anzuwenden.

Letzteres ist ein Auftrag an die Medien, Kommunikatoren und Unternehmensleitungen, Zusammenhänge besser zu erklären und auf die gesellschaftlichen Auswirkungen „runterzubrechen“. Wem ist geholfen, wenn wir von CCU, Circular Economy und H<sub>2</sub>-ready sprechen, der Endverbraucher jedoch nicht nachvollziehen kann, warum Umweltschutz auch Geld kosten kann und welche wirtschaftlichen Chancen für viele Menschen darin stecken? Klimaschutz als Chance funktioniert dann, wenn alle Stakeholder, Unternehmen und Konsumenten, bereit sind, neue Prioritäten und Qualitätsmerkmale zu definieren. Das erfordert ein Umdenken wie es Bertrand Piccard auf dem Global Forum 2023 von Endress+Hauser beschrieb. In seinem inspirierenden Vortrag schilderte er, wie er von Experten belächelt weiter seine Ziele verfolgte, um schließlich 2015/16 mit einem rein durch Sonnenenergie angetriebenen Flugzeug die Erde zu umrunden. Unterstützt von Sponsoren, die bereit waren, dem Paradigmenwechsel zu folgen und das vermeintlich Unmögliche zu machen.

Dieser Prozess kann zunächst unbequem und anstrengend sein. Um dem Ostrich Effect beim Klimaschutz zu überwinden, ist es dringend notwendig, mehr über die Chancen zu sprechen und diese auch für den Endverbraucher fassbar zu machen. Ängste zu schüren, hilft in der Demokratie nicht weiter. Daher halte ich es lieber mit Matthias Altendorf, CEO von Endress+Hauser: „Let's play offense!“, und biete Ihnen in dieser Ausgabe einige technische Lösungen für Kreislaufwirtschaft und mehr Nachhaltigkeit.



Viele Grüße  
Etwina Gandert  
etwina.gandert@wiley.com

## Quellen

[1] Karlsson, N., Loewenstein, G. & Seppi, D. The ostrich effect: Selective attention to information. *J Risk Uncertain* 38, 95–115 (2009).  
<https://doi.org/10.1007/s11166-009-9060-6>

[2] Behre, J., Hölig, S., & Möller, J. (2023). Reuters Institute Digital News Report 2023: Ergebnisse für Deutschland. (Arbeitspapiere des Hans-Bredow-Instituts, 67). Hamburg: Verlag Hans-Bredow-Institut.  
<https://doi.org/10.21241/ssoar.86851>



Etwina Gandert  
Chefredakteurin

Wiley Online Library



Entdecken Sie den Newsletter

CITplus **IN SIGHT**



WILEY



## Fünf Minuten Kaffeepause...

...und dabei den wöchentlichen Newsletter von CHEManager studieren.

Effizienter und entspannter können sich Strategen und Entscheider der Chemiebranche nicht informieren!



<https://bit.ly/3icWheF>

Jetzt ganz einfach kostenlos registrieren:  
[www.chemanager-online.com/newsletter](http://www.chemanager-online.com/newsletter)

CHEManager.com



## 16 Mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie

### Interview mit Prof. Dr. Klaus Kümmerer über die Ziele Nachhaltiger Chemie und die Grenzen der Kreislaufwirtschaft

Prof. Dr. Klaus Kümmerer ist Direktor des Instituts für Nachhaltige Chemie und Inhaber der Professur für Nachhaltige Chemie und Materielle Ressourcen an der Leuphana Universität Lüneburg sowie Director des Research & Education Hub des International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3) in Bonn. Er wurde unter anderem für den „Benign by Design“-Ansatz im Rahmen von „Deutschland – Land der 1.000 Ideen“ vom Stifterverband der Deutschen Wissenschaft ausgezeichnet. Für seine zukunftsweisenden Forschungsleistungen wird ihm am 6. September 2023 der Wöhler-Preis für Nachhaltige Chemie von der GDCh verliehen. Im Interview spricht er über die Bedeutung der Nachhaltigen Chemie für die Kreislaufwirtschaft und wie beides dazu beitragen kann, die großen Herausforderungen jetzt und für die Zukunft zu lösen.

**Leuphana Universität, Lüneburg**  
 Institut für Nachhaltige Chemie  
 Tel.: +49 4131 677-2893  
 klaus.kuemmerer@leuphana.de  
 www.leuphana.de · www.isc3.org

15

## KOMPAKT

- 6 Forschung + Entwicklung
- 7 Termine
- 8 Wirtschaft + Produktion

### FOKUSTHEMA

#### CHEMISCHES RECYCLING

- 12 Eine nachhaltige Lösung für Kunststoffabfälle  
 Chemisches Recycling – Status und Perspektive im industriellen Kontext  
 H. Alwast, Alwast Consulting  
 R. Schu, EcoEnergy

### SONDERTEIL

#### ROHSTOFFE UND KREISLAUFWIRTSCHAFT

- 16 Mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie  
 Interview mit Prof. Dr. Klaus Kümmerer über die Ziele Nachhaltiger Chemie und die Grenzen der Kreislaufwirtschaft  
 Leuphana Universität
- 19 Biogene Produktionsrouten und PtX-Syntheseprozesse kombinieren  
 Fraunhofer IGB
- 20 Recycling von Silikonen ohne Qualitätsverlust  
 Gewinner der ISC3 Innovation Challenge – Technologie des Start-ups New Dawn Silicones spart Energie und CO<sub>2</sub>  
 R. Sutthoff, Fachjournalist
- 22 Nachhaltiger Ruß  
 Verfahrenstechnische Betrachtung der Recovered-Carbon-Black-Produktion  
 M. von Wolfersdorff, Wolfersdorf Consulting
- 24 Meldungen  
 Auf dem Weg zum geschlossenen Kreislauf für PU-Matratzen  
 Covestro  
 Neues Werk für die Verarbeitung von biogenem Kohlendioxid in Sachsen-Anhalt  
 Nippon Gases Deutschland, Verbio Vereinigte BioEnergie

### Beilagen

Bitte beachten Sie die Teilbeilage von Meorga





**25 Nachhaltige Kraftstoffe**  
 Verfahren zur Erzeugung von klimaneutralen Kraftstoffen aus Klärschlamm  
 R. Daschner, A. Apfelbacher;  
 Fraunhofer UMSICHT Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

**28 Für eine umweltfreundliche Abwasserreinigung**  
 Reaktivierung von gebrauchter Aktivkohle der 4. Abwasser-Reinigungsstufe  
 J. Haermeyer, Carbotech

**30 Der Aufstieg von Kohlendioxid als erneuerbare Kohlenstoffquelle**  
 Technologien, Trends und Marktchancen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung  
 P. Ruiz, A. Raschka; Nova-Institut

**33, 36, 39 Produkte**  
 von PST, Systec und Viscotec

**MESS-, STEUER-, REGEL-, AUTOMATISIERUNGSTECHNIK**

**34 Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen**  
 Messtechnik für die Direct Air Capture-Technologien  
 C. Böhringer, für Endress+Hauser

**37 Qualitätskontrolle im chemischen Recycling**  
 ICP-OES und Elementaranalyse der Ausgangsstoffe und Endprodukte  
 S. Beatrice Moos, Analytik Jena Deutschland

**THERMISCHE UND CHEMISCHE VERFAHREN | WERKSTOFFE UND GASE**

**40 Altreifen als Rohstoffquelle**  
 Gewinnung von Ruß aus Altreifen  
 P. Buder, Zeppelin Systems  
 J. Diercks, RCB Nanotechnologies

**43 Klärschlamm: Schadstoff- und Rohstoffquelle zugleich**  
 Thermische Klärschlammverwertung als Grundlage für das Recycling der lebensnotwendigen Ressource Phosphor  
 A. Dous, EEW Energy from Waste  
 J. Kirchof, Glatt Ingenieurtechnik

**MECHANISCHE VERFAHREN | SCHÜTTGUTTECHNIK | LOGISTIK**

**46 Pflege von biobasierten Kühlschmierstoffen**  
 Dynamischen Crossflow Filtration (DCF) mit keramischen Filterscheiben zur Reinigung von Schmierstoffen  
 P. Fuhrmann, Kerafol Keramische Folien

**48 Fahrzeugkatalysatoren zerkleinern**  
 Pulverisierung von Katalysatorwaben zur Analyse  
 D. Klein, Fritsch

**49 Bezugsquellenverzeichnis**

**51 Index | Impressum**

**MEORGA**  
**MSR-Spezialmessen**  
**Prozess- u. Fabrikautomation**

Fachmesse für **Prozess- und Fabrikautomation**

- Messtechnik
- Steuerungstechnik
- Regeltechnik
- Automatisierungstechnik
- Prozessleitsysteme

+ 36 begleitende Fachvorträge

Der Eintritt zur Messe und die Teilnahme an den Fachvorträgen ist für die Besucher kostenlos.

Wirtschaftsregion **Südwest**

**Ludwigshafen**

**13.09.2023**

8.00 bis 16.00 Uhr

**Friedrich-Ebert-Halle**

**Erzbergerstr. 89**

**67063 Ludwigshafen**



**BESUCHER-REGISTRIERUNG**



erforderlich für Einlass-Code

**MEORGA Messen:**

**Landshut 18.10.2023**  
**Frankfurt 20.03.2024**  
**Halle (Saale) 05.06.2024**

**www.meorga.de**

MEORGA GmbH - Sportplatzstr. 27 - 66809 Nalbach  
 Telefon 06838 8960035 - info@meorga.de

**CITplus**

Die Beiträge, die in CITplus veröffentlicht werden, sind auch in der Wiley Online Library (WOL) abrufbar. Dafür wird jeder Artikel mit einem dauerhaften digitalen Identifikator ausgezeichnet, dem Digital Object Identifier (DOI).

Scannen Sie den QR-Code oder klicken Sie im PDF einfach darauf.

**Wiley Online Library**



Wiley Online Library



Die **Meldungen mit DOI** (Digital Object Identifier) auf dieser Seite beruhen auf wissenschaftlichen Originalarbeiten, die in voller Länge in der **Chemie Ingenieur Technik**, Wiley-VCH, Weinheim, erscheinen.

Der Aufruf eines Artikels erfolgt im Webbrowser unter der Adresse <http://dx.doi.org/> mit nachfolgendem DOI.

Wiley Online Library



### Flammschutzmittel entfernen

Durch chemisches Recycling lässt sich der Recyclingkreislauf für Polymere schließen. Dies gilt insbesondere für Polystyrol (PS), bei dem das Monomer Styrol direkt durch Depolymerisation gebildet und anschließend zur Herstellung von neuem PS verwendet werden kann. Einige Abfallquellen enthalten jedoch kritische Additive, wie bromierte Flammschutzmittel. Diese müssen entfernt werden, da heutige Schwellenwerte deren Menge in neuen Produkten

limitieren. Basische Oxide bieten sich als Mittel der Wahl an. Während der thermischen Depolymerisation einer Mischung aus PS und 1,2,5,6,9,10-Hexabromcycloodekan konnten insbesondere Bariumoxid und Calciumoxid bis zu 96 % des Broms aus dem Styrol entfernen.

**Tristan Kolb, Neue Materialien Bayreuth GmbH**  
 tristan.kolb@nmbgmbh.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200196

### Was-wäre-wenn-Analysen

Input-Output-Datensätze kommen überall in der chemischen Verfahrenstechnik vor. Ein interaktives Echtzeit-Navigations-Framework kann, sobald ein Ersatzmodell trainiert ist, Was-wäre-wenn-Analysen sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangsraum durchführen. Das Framework wurde an Datensätzen eines Fließbildsimulators getestet, der einen realen Dampf-Methanreformingprozess modelliert. Das als RINADA („Real-time Interactive Navigation within

a Data set“) bezeichnete System war auch bei der Betrachtung von sieben Input- und fünf Output-Variablen echtzeitfähig. Anhand der (angenähernten) Hülle ließ sich der Abstand zwischen der Navigationsstrajektorie und dem Datensatz im Eingaberaum begrenzen.

**Marco Baldan, Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics ITWM, Kaiserslautern**  
 marco.baldan@itwm.fraunhofer.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200240

### In Echtzeit optimieren

Ein Beispiel für eine Echtzeitoptimierung (RTO) ist die zeitliche Zuordnung von Dampf in einem industriellen Isocyanat-Produktionsprozess. Die Anwendung von RTO in der Praxis sieht sich zwei Problemen gegenüber: Erstens sind die verfügbaren rigorosen Prozessmodelle in Verbindung mit dem Prozess möglicherweise nicht für den Einsatz in Echtzeit geeignet. Zweitens gibt es immer eine Diskrepanz zwischen den Vorhersagen des Modells und dem Verhalten der realen Anlage. Lösung für das erste Problem war, ein neuronales Netzmo-

dell als Surrogat auf Daten aus einem rigorosen Simulationsmodell zu trainieren. Das Modell ist dann einfach zu implementieren und die Ausführung rasch. Das zweite Problem wurde angegangen, indem das Optimierungsproblem basierend auf Messdaten so angepasst wurde, dass eine Konvergenz zu den optimalen Betriebsbedingungen für die reale Anlage erreicht wird.

**Jens Ehlhardt, TU Dortmund**  
 jens.ehlhardt@tu-dortmund.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200244

### Deep-Transfer-Learning für Strömungsregime

Die Überwachung von Strömungsregimen in belüfteten Rührbehältern ist wichtig, um Energieeffizienz und Produktqualität sicherzustellen. Deep-Learning-Modelle sind vielversprechend zur Erkennung von Strömungsregimen. Solche Modelle erfordern jedoch eine große Datenmenge für das Training. Um die Leistung des Deep-Learning-Ansatzes für eine Bild-basierte Klassifizierung von Strömungsregimen zu erhöhen, wurde Deep-Transfer-Learning (DTL) mit verschiedenen vortrainierten Modellen eingesetzt. Zudem wurden zwei verschiedene

DTL-Ansätze verglichen: zweistufiges Feintuning sowie Differential Learning Rate. Im Vergleich zeigte ResNet50 in Kombination mit der zweistufigen Transferlernetechnik die höchste Modellleistung und die niedrigste Trainingsdauer.

**Valentin Khaydarov, Technische Universität Dresden**  
 valentin.khaydarov@tu-dresden.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200246

### Deep Learning für die Kristallgrößenanalyse

Die Kristallgrößenverteilung ist ein entscheidender Faktor bei Kristallisationsschritten feinchemischer und pharmazeutischer Prozesse. Ein auf Deep Learning basierender Ansatz verwendet mikroskopische Bilder als Input für die Kristallgrößenanalyse. Um die für das Lernen notwendigen Daten zu begrenzen, wurde zudem ein Ansatz zur Daten-Augmentierung untersucht. Die Segmen-

tierungsgenauigkeit der Kristalle lag bei 93,02 %. Die Klassifikation der mit dem Convolutional Neuronal Net (CNN) erhaltenen Daten wurde anhand von Bildern mit einer zuvor bestimmten Teilchenfraktion geprüft.

**Norbert Kockmann, TU Dortmund**  
 norbert.kockmann@tu-dortmund.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200235

### Textilien recyceln

Farbstoffe und Additive erschweren das Textilrecycling, daher wird der Großteil des Textilabfalls zu minderwertigen Produkten downgecycelt, verbrannt oder deponiert. In einer Studie wurde eine kontinuierliche Depolymerisation von Post-Consumer-Polyestertextilien durch alkalische Hydrolyse untersucht. Der Depolymerisationsgrad lag bei 94 %. Nach der Rückgewinnung und Analyse der Terephthalsäure

und des Ethylenglykols wurden die Monomere erfolgreich zu einem recycelten Polyethylenterephthalat in Lebensmittelqualität polymerisiert. Mit diesem Ansatz könnten Textilien in einem geschlossenen Kreislauf recycelt werden.

**Stephan Scholl, Technische Universität Braunschweig**  
 s.scholl@tu-braunschweig.de  
 DOI: 10.1002/cite.202200197



## August 2023

Wärmetauscher und Wärmenutzungsanlagen zur Wärmeauskopplung aus Rauchgasen	24. – 25. Aug.	Lübeck-Travemünde	Haus der Technik, <a href="mailto:info@hdt.de">info@hdt.de</a> , <a href="http://www.hdt.de">www.hdt.de</a>
Einführung in die Pneumatische Förderung für Planer, Anwender, Ingenieure und Techniker	30. – 31. Aug.	Essen	Haus der Technik, <a href="mailto:info@hdt.de">info@hdt.de</a> , <a href="http://www.hdt.de">www.hdt.de</a>

## September 2023

NMR-Spektrenauswertung und Strukturaufklärung	6. – 27. Sept. (immer mittwochs)	online	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Datenbasierte Entscheidungsfindung: Grundlagen Explorativer Datenanalyse	11. – 14. Sept.	online	Dechema, <a href="mailto:kurse@dechema.de">kurse@dechema.de</a> , <a href="http://www.dechema-dfi.de/kurse.html">www.dechema-dfi.de/kurse.html</a>
Fest-Flüssig-Trennung 2023	11. – 15. Sept.	Karlsruhe	GVT – Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik, <a href="http://www.gvt.org.de">www.gvt.org.de</a>
Verfahrenstechnik kompakt	12. – 14. Sept.	Frankfurt/Main	Dechema, <a href="mailto:kurse@dechema.de">kurse@dechema.de</a> , <a href="http://www.dechema-dfi.de/kurse.html">www.dechema-dfi.de/kurse.html</a>
Qualitätsrisikomanagement (QRMS)	12. Sept.	online	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
8. Praktikerkonferenz Wasserkraft, Turbinen, Systeme	12. – 13. Sept.	Graz	Jaberg&Partner, <a href="mailto:margot.jaberg@jabergundpartner.com">margot.jaberg@jabergundpartner.com</a> , <a href="http://www.wasserkraft-graz.at">www.wasserkraft-graz.at</a>
MSR-Spezialmesse Südwest	13. Sept.	Ludwigshafen	<a href="mailto:info@meorga.de">info@meorga.de</a> , <a href="http://www.meorga.de">www.meorga.de</a>
Brandschutz im Tank- und Gefahrgutlager	13. Sept.	Essen	Haus der Technik, <a href="mailto:info@hdt.de">info@hdt.de</a> , <a href="http://www.hdt.de">www.hdt.de</a>
Staub	13. – 14. Sept.	Wuppertal	GVT – Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik, <a href="http://www.gvt.org.de">www.gvt.org.de</a>
Die Qualitätssysteme GMP (Gute Herstellungspraxis) und GLP (Gute Laborpraxis) im Überblick – Ein Leitfaden der Guten Praxis	14. Sept.	Frankfurt/Main oder online	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Innovationsmanagement in der Chemie	14. – 15. Sept.	Frankfurt/Main	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Neue analytische Methoden und rechtliche Vorgaben in der Pestizidanalytik	19. Sept.	Frankfurt/Main	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Design of Experiments	19. – 21. Sept.	Frankfurt/Main	Dechema, <a href="mailto:kurse@dechema.de">kurse@dechema.de</a> , <a href="http://www.dechema-dfi.de/kurse.html">www.dechema-dfi.de/kurse.html</a>
Prozesssicherheit: Praktische Betriebs- und Führungswerkzeuge zur Störfallvermeidung	20. – 21. Sept.	Frankfurt/Main	Dechema, <a href="mailto:kurse@dechema.de">kurse@dechema.de</a> , <a href="http://www.dechema-dfi.de/kurse.html">www.dechema-dfi.de/kurse.html</a>
Moderne Rietveld-Analyse in der praktischen Übung	21. – 22. Sept.	Frankfurt/Main	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Polymerisationstechnik	25. – 27. Sept.	Hamburg	Dechema, <a href="mailto:kurse@dechema.de">kurse@dechema.de</a> , <a href="http://www.dechema-dfi.de/kurse.html">www.dechema-dfi.de/kurse.html</a>
Rheologische Charakterisierung von Emulsionen und Suspensionen	26. Sept.	Nürnberg	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Powtech/Partec	26. – 29. Sept.	Nürnberg	Messe Frankfurt, <a href="http://www.powtech.de">www.powtech.de</a>
GLP-Intensivtraining mit QS-Übungsaufgaben: Methodvalidierung und Gerätequalifizierung unter GLP (Gute Laborpraxis) – Mit Praxisteil	26. – 28. Sept.	Frankfurt/Main	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>
Hydrogen Technology Expo	27. – 28. Sept.	Bremen	Messe Bremen, <a href="http://www.hydrogen-worldexpo.com">www.hydrogen-worldexpo.com</a>
Kristallisation und Fällung	27. – 29. Sept.	online	GVT – Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik, <a href="http://www.gvt.org.de">www.gvt.org.de</a>
Numerische Berechnung turbulenter Strömungen in Forschung und Praxis	27. – 29. Sept.	Dresden	GVT – Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik, <a href="http://www.gvt.org.de">www.gvt.org.de</a>
IImac	28. Sept.	Basel	Messe Schweiz, <a href="http://www.ilmac.ch">www.ilmac.ch</a>

Wiley Online Library



## Hima-Gruppe erreicht Allzeithoch im Auftragsseingang

In 2022 erreichte die Hima-Gruppe ein weiteres Rekordjahr und hat das Jahr mit einem Plus von 18 % im Auftragseingang abgeschlossen. Durch Digitalisierung, Internationalisierung und den Ausbau von Partnerschaften erwartet der Anbieter sicherheitsgerichteter Automatisierungslösungen weiteres Wachstum in 2023. Hima erzielte in 2022 mit 155,8 Mio. EUR den höchsten Auftragseingang in der Geschichte – 18 % mehr als noch im Jahr zuvor. Mit einem Umsatz von 126,6 Mio. EUR erreichte Hima annähernd das bisherige Allzeithoch von 2021. „Die Hima-Gruppe hat sich in 2022 gut behauptet. Mit der Übernahme von Sella Controls haben wir zudem ein neues Kapitel für internationales Wachstum im Bereich Bahntechnik aufgeschlagen“, sagt Jörg de la Motte, CEO. Insgesamt entwickelte sich die Nachfrage in den Hima-Kernmärkten positiv. Die Umsätze verteilen sich auf die Regionen wie folgt: Europa (59 %), Middle East (12 %), Asien (20 %), Amerika und überregionale Projekte (9 %). Erfreulich entwickelte sich auch die Auftragsbasis, so kletterte der Auftragsbestand gegenüber 2021 um 38 %. „Wir haben das Geschäftsjahr 2022 trotz vieler Herausforderungen gut gemeistert und auch das erste Quartal 2023 stimmt uns angesichts eines weiterhin erfreulichen Auftragseingangs sehr positiv“, sagt Dr. Michael Löbig, CFO, und verweist auf die Nachwirkungen der Coronapandemie,



Jörg de la Motte (CEO) und Dr. Michael Löbig (CFO) von HIMA.

Schwierigkeiten in der Lieferkette und die Folgen des Ukraine Krieges. Die Gruppe investierte 2022 12 % ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung und hat sich zum Ziel gesetzt, die funktionale Sicherheit zu digitalisieren. Die Prozessindustrien (Öl & Gas, Raffinerien und Chemieindustrie) gehören nach wie vor zur größten Kundengruppe. Der Bereich Bahntechnik entwickelte sich ebenfalls positiv. Über alle Branchen wurden 30 % des Umsatzes mit Dienstleistungen und Software generiert. „Das positive Kundenfeedback zeigt uns, dass wir mit unserer Digitalisierungsstrategie #safetygoesdigital den Nagel auf den Kopf getroffen haben“, erklärt Jörg de la Motte.

Zu den Schwerpunkten von Hima in 2023 gehört neben weiteren Investitionen in F&E

– insbesondere für Software und Applikationen – die Internationalisierung und der Ausbau von Partnerschaften. „Die Eröffnung des neuen Hima Security Labs in unserem Customer Solutions Center markiert einen weiteren Meilenstein“, sagt Jörg de la Motte. „In enger Zusammenarbeit mit unserem Partner Genua werden unsere OT-Security-Lösungen dort erfahrbar gemacht“, fügt er hinzu. Zudem intensiviert Hima in die Zusammenarbeit mit globalen Partnern für Vertrieb, Engineering und die gemeinsame Lösungsentwicklung. Die Internationalisierung bleibt ein wichtiges Element der Wachstumsstrategie. Neben der Übernahme von Sella Controls im Februar 2023, mit der Hima die Präsenz im Vereinigten Königreich ausbaut sowie die Expertise und das Lösungsportfolio im Bahnbereich erweitert, hat Hima zuletzt die Vertriebs- und Servicepräsenz in Frankreich erweitert, in Dubai einen neuen regionalen Hauptsitz eröffnet und in Argentinien eine eigene Gesellschaft gegründet. Dr. Michael Löbig sagt: „Mit diesen Maßnahmen bauen wir unsere globale Vertriebs- und Servicepräsenz weiter aus und untermauern unseren Anspruch, unsere Kunden vor Ort in der Digitalisierung der funktionalen Sicherheit bestmöglich zu unterstützen.“ Weitere regionale Erweiterungen sind mit Fokus auf die Zielmärkte Middle East und Asien geplant.

[www.hima.com](http://www.hima.com)

## Vega investiert in Gebäude und Schulungsmöglichkeiten

Vega hat gleich mit vier Niederlassungen in den vergangenen Monaten neue Gebäude bezogen. In Großbritannien, den USA, Südafrika und Spanien haben die Mitarbeiter nun deutlich mehr Platz zur Verfügung. Damit investiert der Spezialist für innovative Messtechnik mit Hauptsitz in Schiltach, wo Anfang Juni der 1.000. Mitarbeiter begrüßt wurde, weiter in seine Zukunft und legt dabei viel Wert auf Nachhaltigkeit. Für die Mitarbeiter des Unternehmens soll gleichzeitig eine Umgebung geschaffen werden, die sich „nicht nach reiner Arbeit anfühlt, sondern wie ein zweites Zuhause“, betonte Isabel Grieshaber, geschäftsführende Gesellschafterin der Vega Grieshaber, bei der Eröffnung des neuen Gebäudes in Südafrika. Großes Augenmerk legte das Unternehmen bei der Gestaltung der vier Niederlassungen auch auf den Ausbau der Schulungsmöglichkeiten. Das Angebot an Seminaren und Trainings wird von den Kunden weltweit geschätzt und nachgefragt. „Wir investieren in unsere Leistungsfähigkeit, um unseren Kunden einen noch besseren Service bieten zu können“, erklärte daher John Groom, Geschäftsführer von Vega Americas, zur Eröffnung des mehr als 21.000 m<sup>2</sup> großen Firmenkompleses in Mason (Ohio). Insgesamt stehen die Zeichen bei Vega weltweit auf Wachstum – im wortwörtlichen, aber auch im übertragenen Sinne. Auf den Punkt gebracht hat das Carlos Montala, Geschäftsführer von Vega Instrumentos, bei der feierlichen Einweihung des neuen Gebäudes in Spanien: „Ich bin zuversichtlich, dass wir gemeinsam weiter wachsen und unseren Kunden innovative und zuverlässige Lösungen bieten werden.“

[www.vega.com](http://www.vega.com)



Markus Kniessel (links) und Isabel Grieshaber, Geschäftsleitung der Vega Grieshaber, eröffnen mit Carlos Montala, Geschäftsführer von Vega Instrumentos, das neue Gebäude in Spanien.

Wiley Online Library





## Kreislaufwirtschaft mit KI und Automatisierung braucht Technologieoffenheit

„Wir stellen uns den Zukunftsthemen und wollen diese in der Mess- und Automatisierungstechnik mit vernetzten Daten und KI positiv gestalten“, sagt Prof. Michael Weyrich, Vorsitzender der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik im Zuge der VDI-Konferenz Automation in Baden-Baden. Doch Hemmnisse aus der Gesellschaft sowie politische Regulierungsdiskussionen bremsen die KI-Entwicklung für den Industriestandort Deutschland aus. Ingenieurinnen, Ingenieure sowie der Nachwuchs tragen hier eine besondere Verantwortung. Weyrich erklärt: „Wir konzentrieren uns in der gesellschaftlichen Diskussion auf Fragen der Ethik, des Rechts und der Regulierung, ohne die konkreten technologischen Herausforderungen aufzuzeigen und uns für deren technische Lösung zu begeistern. Ingenieurinnen und Ingenieure widmen sich der Gestaltung von Technologie und schaffen damit die Zukunft.“ Technologieoffenheit ist ein großes Thema in der Mess- und Automatisierungstechnik. „Erst technologieoffen über die Möglichkeiten nachdenken und dann die Technologien machen, die man aus rechtlichen und ethischen Gründen auch umsetzen will,“ sagt Weyrich. Jetzt und in Zukunft sei die Digitalisierung und Automatisierung Enabler der Nachhaltigkeit in allen Sektoren, meint Dr. Wilhelm Otten, Vorsitzender des Interdisziplinären Gremiums Digitale Transformation im VDI, Inhaber Wotten Consulting. Der Aufbau und das Management der Kreislaufwirtschaft sind für den Wirtschaftsstandort Deutschland entscheidend, denn 45 % des Primärenergiebedarfs des Landes fließt in Produktion und Gewerbe. „Wesentliche Rohstoffe sind in ihren Vorkommen limitiert und müssen importiert werden. Kreislaufwirtschaft



© Sven Ochowitz

Prof. Michael Weyrich



© Dr.-Ing. Otten

Dr. Wilhelm Otten



© Heinz Nixdorf Institut Universität Paderborn

Prof. Iris Gräßler

macht die Industrie unabhängig von Rohstofflieferländern und resilient“, so Otten. Doch der Aufbau der Kreislaufwirtschaft verlangt Veränderungen. Festmachen ließe sich das laut Wilhelm Otten an einem veränderten Kaufverhalten und dem Ruf nach nachhaltigen Geschäftsmodellen. „Das Informationsmanagement entlang der gesamten Wertschöpfungsketten unter Nutzung der Simulation und KI ist entscheidend, um die notwendige Transparenz zu schaffen und die Kreislaufwirtschaft zu optimieren“, gibt er an. Er ist sich sicher, dass in der Produktion KI nur in Verbindung mit ingenieurtechnischen Kompetenzen erfolgreich sein wird. „Zur Meisterung dieser Herausforderungen bedarf es überzeugter, junger Ingenieurinnen und Ingenieure, die die Technologieentwicklung treiben und gestalten.“ Prof. Iris Gräßler, Vorsitzende des VDI-Fachbeirats Digitalisierung und Virtualisierung sowie Vorstand am Heinz Nixdorf Institut an der Universität Paderborn, bekräftigt im Zuge des Kongresses: „Um Klimaneu-

tralität zu erreichen, brauchen wir kreislauffähige Produkte.“ Mit der Forderung nach Kreislaufwirtschaft werden nicht nur die technischen Systeme an sich komplexer, sondern auch ihre Lebenszyklen. Ressourcenverbräuche, Abgasemissionen und Recyclingprozesse, die über einen Digitalen Zwilling abgebildet werden, gehen mit massenhaften Datenmengen einher. „Diese Datenmengen stammen aus verschiedenen Quellen, unterliegen großen Schwankungen und Unsicherheiten – wir sprechen in diesem Zusammenhang auch von extremen Daten“, ordnet Gräßler ein. Laut ihr reichen etablierte Verfahren, wie Heuristiken, Modelle und Simulationen, nicht mehr aus, um Daten vollständig und schnell genug berücksichtigen zu können. „Mithilfe von KI-Algorithmen werden zukünftige Entwicklungsentscheidungen unterstützt. Es gilt also, mit Automatisierung und KI die Grundlagen für eine neue Leistungsfähigkeit in der Produktentstehung zu legen“, schließt sie.

[www.vdi.de](http://www.vdi.de)

## GVT Fortbildungskurse 2023

- **Numerische Berechnungen turbulenter Strömungen 2023**  
Dresden: 27. – 29.09.2023  
Kursleiter: Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber
- **Fest Flüssig Trennung 2023**  
Karlsruhe, Kit: 11.09. – 15.09.2023  
Kursleiter: Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl, Dr.-Ing. Marco Gleiß, Dr.-Ing. Harald Anlauf
- **Staub (freisetzung): Bestimmung der Ausbreitung von Staub und Aerosolen**  
Wuppertal: 13. – 14.09.2023  
Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Harald Kruggel-Emden
- **Kristallisation und Fällung 2023 Online**  
online: 27. – 29.09.2023  
Kursleiter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Kind, KIT Karlsruhe
- **Simulation partikelbeladener Strömungen 2023**  
Karlsruhe, Kit: 04. – 06.10.2023  
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl, Dr.-Ing. Marco Gleiß, Dr. rer. nat. Mathias Krause
- **Destillation 2023**  
München/Garching 22. – 24. November 2023  
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Harald Klein, Dr.-Ing. Sebastian Rehfeldt



# „Let's play offense!“

Die nachhaltige Transformation der Prozessindustrie stand im Zentrum des Endress+Hauser Global Forums



© Geradent, CITplus

Zum ersten Endress+Hauser Global Forum vom 26. bis 28. Juni 2023 waren mehr als 850 Kunden, Partnerunternehmen und Medienvertreter nach Basel gereist. Im Zentrum des Forums stand die Frage, wie die nachhaltige Transformation der verfahrenstechnischen Industrie gelingen kann. Matthias Altendorf, CEO von Endress+Hauser, eröffnete das Forum mit der Aufforderung an alle Teilnehmer: „Let's play offense!“ – Herausforderungen in Möglichkeiten umwandeln, statt den Kopf in den Sand zu stecken. Der Klimawandel und die notwendige Reduktion des Energiebedarfs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erfordern es von allen Teilhabern der Wertschöpfung, technische Lösungen zu finden. Endress+Hauser wolle wachsen, werde dabei aber seinen CO<sub>2</sub>-Footprint nicht vergrößern.

Die Prozessindustrie ist als wesentlicher Akteur in der Wertschöpfungskette maßgeblich für die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Zukunft verantwortlich. Das Global Forum beleuchtete Themen wie Dekarbonisierung, Energiewende, Kreislaufwirtschaft, Ressourcen- und Energieeffizienz aus Anwender- und Expertensicht. Wie dramatisch die Situation ist, durften die Teilnehmer des Forums im Vortrag von Mike Berners-Lee erfahren. Es erwartet ein Bewusstseinswandel jedes Einzelnen, wie wertvoll Ressourcen und Energie ist und dass es nicht reicht, nur auf erneuerbare Energien zu setzen. Energie und Ressourcen sparen sei der Schlüssel für die Zukunft der Menschheit.

Den notwendigen Optimismus verbreiteten die 45 Minuten mit Bertrand Piccard, der über die notwendige Sichtweise sprach, um technologisch disruptive Ziele zu erreichen. Ein 'Nein'

oder das ist nicht möglich' akzeptierte er nicht als Antwort und erreichte mit seiner Unnachgiebigkeit und seinem festen Ziel, bis dahin vermeintlich Unmögliches.

In den technischen Vorträgen für die anwesenden Journalisten ging es darum, wie Sustainability bei Endress+Hauser gelebt und wie das Unternehmen aus den Herausforderungen Chancen generieren wird. Julia Schempp, verantwortlich für Corporate Social Responsibility bei Endress+Hauser, schilderte in ihrem Vortrag die Anforderungen der Nachhaltigkeitsberichterstattung und wie anspruchsvoll der „Tsunami“ an globalen Richtlinien sei. Gleichzeitig werden an das Unternehmen von zahlreichen Kunden Anfragen zum Thema Nachhaltigkeit gestellt. Sie betonte, dass nachhaltiges Wirtschaften nur mit allen Partnern gemeinsam gelingen könne. Hier spiele die Transparenz der Daten eine große Rolle, die in großen Teilen noch nicht gegeben sei oder die Daten noch nicht vorhanden seien. Ergänzend betonte Paul Borggreve, Corporate Director Marketing Endress+Hauser, dass es zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele es auch einen Markt bedarf und die Kunden diese Ziele gleichermaßen verfolgen müssten. Collaborative Innovation sei ein Schlüssel zum Erfolg.

Messtechnische Lösungen von Endress+Hauser für Prozesswasser, für Elektrolyte, für die Wasserstoffwirtschaft, stellten Frederick Effenberger und Jens Hundrieser vor. Kevin Rueff Chief Product Owner, beschrieb wie sich mit IIoT das Beste aus den Prozessdaten machen lässt. Am zweiten Tag ging es um Analysetechnik von der E+H-Tochter Analytik Jena und um Prozessanalysetechnik von Endress+Hauser. Wolfgang Lubcke, Senior

Instrumentation Specialist, zeigte in seinem Vortrag, wie Inline-Raman-Spektroskopie zur Ressourceneffizienz beitragen kann und Simone Beatrice Moos Program Manager, stellte die Analysemethoden und -Geräte vor, die im chemischen Recycling, genauer zur Qualitätskontrolle von Pyrolyseöl, geeignet sind. Spannend war auch der Vortrag von Bernd Herrmann, CEO PhyoX, der mit Enthusiasmus und Unterstützung von Endress+Hauser, aus einer Idee ein Unternehmen mit über 3 Mio. EUR Umsatz aufgebaut hat. PhyoX züchtet Algen von hoher Qualität im großen 10.000-Liter-Maßstab. Für den biotechnologischen Prozess ist das Erfassen zahlreicher Prozessdaten, wie pH, Temperatur, Durchfluss und Füllstand unverzichtbar und die Anforderungen zur Prozesskontrolle werden steigen und damit die Notwendigkeit weiterer Messtechnik. Begleitet wurden die Vorträge von einer beeindruckenden Ausstellung von Endress+Hauser und Partnern wie Phoenix Contact, Hima Paul Hildebrandt, Flowserve Corporation, Auma Group, Pepperl+Fuchs Gruppe, Schneider Electric, Softing, Rockwell Automation.

Endress+Hauser feierte mit dem Global Forum das 70-jährige Bestehen des Unternehmens. Das Familienunternehmen folgt einer auf langfristigen Erfolg ausgerichteten Strategie, die wirtschaftlichen Erfolg mit ökologischer und sozialer Verantwortung verbindet. „Die Prozessindustrie hat das Potenzial, durch ihre Bemühungen in den Bereichen Energiewende, Nachhaltigkeit und Ressourcenkonsum eine treibende Kraft für positive Veränderungen zu sein“, ist CEO Matthias Altendorf überzeugt. (ega) [www.de.endress.com](http://www.de.endress.com)

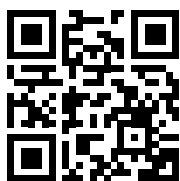




**CIT**plus  
[IN SIGHT]

# CITplus Insight Themen-Newsletter

Einmal monatlich sendet CITplus einen Überblick über ein aktuelles Thema für die Ingenieure der prozess- und verfahrenstechnischen Industrien – aus der Praxis für die Praxis – im digitalen Format.



Registrieren Sie sich hier:  
[www.chemanager-online.com/citplus/newsletter](http://www.chemanager-online.com/citplus/newsletter)

**Wir freuen uns über Ihre Teilnahme.**

**Kontakte Mediaplanung:**  
**Stefan Schwartze**  
+49 6201 606 491  
sschwartze@wiley.com

**Hagen Reichhoff**  
+49 6201 606 001  
hreichhoff@wiley.com

**Kontakt Redaktionsplanung:**  
**Dr. Etwina Gandert**  
+49 6201 606 768  
egandert@wiley.com

**WILEY** VCH

# Eine nachhaltige Lösung für Kunststoffabfälle

## Chemisches Recycling – Status und Perspektive im industriellen Kontext

### FOKUS

Was hat E-Mobilität mit chemischem Recycling zu tun? Das verbindende Element ist Naphtha, das als Nebenprodukt bei der Herstellung von Automobilkraftstoffen aus Erdöl entsteht. Naphtha bildet die Grundlage für die im Steamcracker hergestellten Basismoleküle der Kunststoffproduktion. Solange keine Umstellung auf E-Mobilität erfolgt, bleibt die Produktion von Kunststoffen aus Naphtha bestehen. Obwohl großtechnische chemische Recyclingverfahren bereit sind, besteht derzeit kein Bedarf an zusätzlichen Rohstoffen für die Kunststoffproduktion.

In der heutigen Zeit sind Kunststoffe aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken und nahezu unverzichtbar. Da jedoch Kunststoff in der Umwelt kaum abgebaut wird, kann ihre weit verbreitete Nutzung und unsachgerechte Entsorgung zu erheblichen Umweltproblemen führen, darunter die Vermüllung der Ozeane und die Freisetzung von Treibhausgasen. Dem will die EU entgegenwirken. Die EU strebt zudem eine Energiewende an, wie sie durch die Annahme der EU-Taxonomie im Jahr 2022 deutlich wird. Unser Ziel ist es, klimafreundliche Maßnahmen zu ergreifen, wie sie der europäische Green Deal vorsieht. Um das Ziel einer Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 zu erreichen, ist konsequentes Handeln erforderlich, um ohne Erdöl als Treib-, Brenn- und Rohstoff auskommen zu können. Doch woher sollen dann unsere Kunststoffe kommen, die

bisher aus dem Nebenprodukt der Erdölraffination, dem Naphtha hergestellt werden?

Bisher konnte die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen nur etwa 10 % der neuen Kunststoffe ersetzen, und es ist äußerst schwierig, diesen Anteil wesentlich zu erhöhen. Rund 90 % der recycelten Post-Consumer-Kunststoffabfälle mussten somit neue oder alternative Märkte finden, indem sie zu eher dickwandigen Produkten wie Paletten, Parkbänken, Terrassendielen oder Palisaden verarbeitet werden, dem so genannten Downcycling. Die werkstoffliche Verwertung hat so bisher zu einem Anstieg der Kunststoffverwendung geführt, nicht zur Kunststoffvermeidung. Es konnte die Produktion von neuen Kunststoffen kaum ersetzen.

Kunststoffe bestehen hauptsächlich aus Polymeren auf Kohlenwasserstoffbasis, wie

Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylchlorid (PVC), Polyurethan (PUR), Polyamid (PA) oder Polystyrol (PS). Neben den Polymeren enthalten Kunststoffe aber auch mineralische, metallische, halogenhaltige und organische Zusatzstoffe, die die Qualität, Funktion und Haltbarkeit des Kunststoffs erzeugen. Selbst wenn Kunststoffe optimal sortenrein erfasst und von Verunreinigungen gereinigt werden, ist es fast unmöglich, die richtige Zusammensetzung dieser Additive für die jeweilige spätere gleichwertige Anwendung wiederherzustellen. Dies verdeutlicht die Komplexität der Aufgabe des Kunststoffrecyclings.

Ein aktueller Ansatz zur Erweiterung des Potenzials des mechanischen Recyclings besteht darin, unter der Voraussetzung, dass bereits sortenreine Kunststoffe vorliegen, die



#### Keywords

- *Chemisches Recycling*
- *Kohlevergasung*
- *Kunststoff*
- *Naphtha*



Additive (z.B. die Weichmacher) durch den Einsatz von Lösemitteln zu extrahieren. Auf diese Weise können die Additive dann bei Bedarf den gereinigten Polymeren wieder zugeführt werden.

### Rückblick auf die Recyclingentwicklung

Die Verpackungsverordnung aus dem Jahr 1991 hat mit dem ebenso eingeführten Dualen System Deutschland (DSD) zur Erfassung der Einwegverpackungen, das mechanische Recycling der Kunststoffe überhaupt nicht auf dem Schirm gehabt. Machbarkeit und Kosten des dualen Systems wurden fast ausschließlich mit dem Potenzial des chemischen Kunststoffrecyclings begründet. Konkret war hierzu die Methanolproduktion des Vergasungskomplexes „SVZ Schwarze Pumpe“, die Kohle-Öl-Anlage in Bottrop zur Produktion von Kohlenwasserstoffen für die chemische Industrie, unter anderem zur Produktion von Kunststoffen, und das Stahlwerk Klöckner-Stahl zur Reduktion von Eisenerz und Treibhausgasminde rung als Recyclingoptionen für die damals prognostizierten 500.000 Mg/a Kunststoffverpackungsabfälle aus der getrennten Sammlung vorgesehen. Das mechanische Recycling konnte erst später aufgrund der Sprunginnovation der NIR-Sortiertechnologie und vieler weiterer effizienter Sortiertechnologien einen neuen Markt für Recyclingprodukte entwickeln, die jedoch kaum in Konkurrenz zu Neuprodukten standen.

Von 2001 bis 2003 wurden 95 % aller DSD-Anlagen mit dieser neuen NIR-Technologie ausgestattet. Mit der fortschreitenden Digitalisierung wurde die NIR-Technologie ent-

scheidend weiterentwickelt, reicht aber wegen der erforderlichen gleichbleibenden Qualitäten nicht aus, um relevant Neukunststoffe zu ersetzen. Ein Blick auf die Rohstoffe der Kunststoffherstellung in Europa weist Naphtha aus der Erdölraffination als den hauptsächlichen Grundstoff der Kunststoffproduktion aus. Es fällt genau so viel Naphtha an, wie bei der Herstellung der Zielprodukte der Raffinerie, v.a. der Treibstoffe Benzin und Diesel für die Mobilität produziert wird.

Eine Reduzierung der Kunststoffproduktion und eine damit initiierte Abfallvermeidung steht somit in einem komplexen Zusammenhang mit der chemischen Industrie und der erdölbasierten Verwendung im Sektor der Mobilität. Pauschal könnte man sagen: Es ist in Europa nicht mehr Kunststoff produziert worden als bei der Erzeugung von Treibstoffen an Nebenprodukt Naphtha entstanden ist, aber leider auch nicht weniger!

### Chemisches Recycling zwischen Gestern und Heute

Es gibt Staaten, die schon frühzeitig auf andere Rohstoffe als Naphtha zur Kunststoffproduktion geschaut haben, gerade vor und nach 1973 mit der ersten globalen Ölkrise.

Das chemische Recycling, oder auch „Coal-to-Chemicals“ wurde überall dort massiv entwickelt, wo der Zugriff auf Rohöl erschwert und mit einer national sehr guten Verfügbarkeit von Kohle kombiniert war. Derzeit ist China der weltweit größte Hersteller von Kunststoffen aus Kohle, vorwiegend über druckaufgeladene Flugstromvergaser. Ebenso führten Entwicklungen von General Electric (GE), auf Basis von

seit 1952 genutzten atmosphärischen Flugstromvergäsern schließlich 1983 zum ersten kommerziell betriebenen druckaufgeladenen Flugstromvergaser des US-Chemiekonzerns Eastman als Coal-to-Chemical Anlage. Kunststoffabfälle werden in dieser Anlage ab 2019 bereits in großem Umfang für das chemische Recycling verwendet. Dies erfolgt heute anteilig auch in den mehr als 60 großen Coal-to-Chemicals-Anlagen in China mit einem Durchsatz von jeweils mehreren Millionen Tonnen pro Jahr.

Alternative Technologien, die auf dem Prinzip der Schacht- oder der Wirbelschichtvergasung von Kohle beruhen, haben sich für die Coal-to-Chemical-Anlagen nicht durchgesetzt. Dies liegt zum einen an den geringeren Durchsätzen dieser Technologien im Vergleich zum Druck-Flugstromvergaser, aber auch an deren besonderen Anforderungen an die Kohlequalität.

In deutschen Erdölraffinerien wiederum sind nur Verarbeitungskapazitäten im Millionen-Tonnen-Bereich wirtschaftlich sinnvoll. Insgesamt gibt es in Deutschland an weniger als 15 Standorten zusammen mehr als 100 Mio. t Rohölverarbeitungskapazität pro Jahr, d.h. durchschnittlich etwa 7 Mio t pro Jahr und Standort.

Pioniere in der chemischen Verwertung von Kunststoffabfällen waren Unternehmen wie KWU mit dem Schwel-Brenn-Verfahren, das ursprünglich Wasserstoff aus Pyrolysegas und Pyrolysekoks erzeugen sollte. Für das Cracken des Pyrolysegases und des Pyrolysekokes sollte ein Gaswandler, bestehend aus einem glühenden Koks-Fließbett, verwendet werden. Der Gaswandler hat jedoch nie funktioniert,





um ein für die chemische Weiterverwendung geeignetes Synthesegas zu erzeugen. Mit der Entwicklung des Druck-Flugstromvergasers sollte die Pyrolyse an diese Technologie angepasst werden. Hierzu wurde das Noel-Konversionsverfahren als auch das Choren-Verfahren als Versuchsanlagen, beide auf der Basis des Druck-Flugstrom-Vergasers, realisiert und weiterentwickelt.

Ab 1995 wurden im ehemaligen VEB-Gaskombinat Schwarze Pumpe diverse Braunkohleschachtvergaser zum anteiligen Einsatz von kunststoffhaltigen Abfällen zur Methanolproduktion umgebaut und hierzu ebenso neue Steinkohlevergaser installiert. Leider konnte der erhoffte hohe Abfallanteil im Brennstoffgemisch mit Kohle aufgrund zu geringer Thermostabilität der hierfür erzeugten Briketts nicht erreicht werden. Der druckbeaufschlagte Flugstromvergaser konnte nur mit flüssigen oder fein gemahlenden suspendierten Abfällen betrieben werden. Dies hat für die technologische Entwicklung des chemischen Recyclings zwar einen großen Beitrag geleistet, aber es hat zu diesem Zeitpunkt kein wirtschaftlich akzeptables Verfahren hervorgebracht.

Der Durchbruch des chemischen Recyclings mit dem druckaufgeladenen Flugstromvergaser gelang mit Unterstützung bei der Entwicklung von ABB (TwinRec) und Lurgi (Rowitec), der japanischen Firma EBARA. Der wesentliche Unterschied zu den oben genannten Verfahren liegt in der vorangeschalteten intern rotierenden Wirbelschichtvergasung zur Brennstoffkonditionierung.

Da die Druck-Flugstromvergasung nur aschearme, pulverförmige oder flüssige Brennstoffe verarbeiten kann, übernimmt die druckaufgeladene EBARA-Wirbelschichttechnologie die thermische Konditionierung der Abfälle. Bei der Vergasung bei niedriger Temperatur entstehen Koks und ein sehr kohlenwasserstoffreiches („fettes“) Gas, wie bei der Pyrolyse. Der Koks wird von der rotierenden Wirbelschicht durch das Sandbett pulverisiert und kann so mit dem kohlenwasserstoffreichen Gas der Druck-Flugstromvergasung zugeführt werden. Die Asche wird in der Wirbelschicht ausgetragen und so gelangt nur ein geringer Ascheanteil in den Flugstromvergaser.

Seit 1999 wurde in Japan so das chemische Recycling von getrennt gesammelten Kunststoffabfällen mit dem EBARA-System eingeführt und wird ab 2001 in einer ersten kommerziellen Anlage mit 35.000 Mg/a und ab 2003 in einer weiteren Anlage mit 70.000 Mg/a betrieben. Das japanische Konsortium aus dem Chemieunternehmen Showa Denko, dem Kunststoffhersteller UBE, dem Anlagenbauer EBARA und dem Maschinenbaukonzern JGC bietet aktuell diese Technologie für das chemische Recycling von Kunststoffabfällen weltweit an.

### Zukunft des chemischen Recyclings

Auf dieser Technologie beruhend, könnten in Deutschland innerhalb von maximal fünf Jahren an Raffinerie- oder Chemiestandorten die Kapazitäten für das chemische Recycling mit etwa einem Dutzend Anlagenlinien mit jeweils bis zu 500.000 Mg/a installiert und damit alle in Deutschland anfallenden Kunststoffabfälle, die nicht mechanisch verwertbar sind, chemisch recycelt werden.

Dies könnte somit eine nachhaltigere Lösung anstelle der heute noch vorwiegenden Verbrennung dieser Kunststoffabfälle darstellen, da hierbei die Rohstoffe für eine Kunststoffproduktion erhalten bleiben. Solange aber nicht konsequenter auf Elektroantriebe umgestiegen und künftig weiterhin etwa die gleiche Menge an Kraftstoffen verbraucht wird, wird der Rohstoff der heutigen Kunststoffproduktion, Naphtha, als Nebenprodukt der Benzin- und Dieselherstellung weiterhin produziert und muss damit vorwiegend zu Kunststoffen verarbeitet werden.

Die chemische Industrie schlägt hierfür neben, u.a. Verfahren der Solvolyse, Depolymerisation oder des enzymatischen Recyclings vor, eher kleine dezentrale Pyrolyseanlagen zu bauen, um über deren Output ihre Steamcracker weiter auszulasten und so auch bei sinkenden Naphthamengen weiter zu betreiben. Der Nachweis, dass Pyrolyseöl hierfür kein Abfall mehr ist, muss jedoch noch erbracht werden. Bislang gibt es in Deutschland keine bekannte Genehmigung für den direkten Einsatz von Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen in Steamcrackern. Aber selbst, wenn es sie gäbe,

ist die bisherige Pyrolysetechnik nur für kleine Kunststoffmengen geeignet und zudem sehr ineffizient: Das unvermeidbar entstehende Pyrolysegas ist nur bedingt energetisch nutzbar und mit nicht zu vernachlässigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden. Der Pyrolysekoks ist ebenfalls nicht als Produkt vermarktbar. Es wird die Hoffnung genährt, dass chemisches Recycling vieler Kunststoffabfälle so in Zukunft möglich sein wird, nur eben noch nicht heute. Diese Strategie funktioniert, da die chemische Industrie derzeit keine recycelten Kunststoffe benötigt, weder aus dem mechanischen noch aus dem chemischen Recycling. Dies liegt daran, dass die Verkehrswende mit Elektrifizierung noch in den Kinderschuhen steckt und Naphtha immer noch reichlich in den Raffinerien als Nebenprodukt produziert wird.

Unbenommen dieser Einschränkungen bietet das chemische Kunststoffrecycling, v.a. der Vergasung in der Zukunft aber ein enormes Potenzial für eine hoch vernetzte sowie nachhaltige Kunststoffwirtschaft, die zu einer Rohstoffhaltungsstrategie, inkl. der umfassenden Nutzung des Wasserstoffs und des Kohlendioxids aus Kunststoffabfällen führen wird. Anstrengungen müssen aber unternommen werden, um ein günstiges regulatorisches Umfeld, z.B. durch Normung sowie ein passendes wirtschaftliches Umfeld für die Entsorgungswirtschaft und die chemische Industrie zu schaffen, das deren Anwendung und die Skalierung der Technologien künftig fördert.

### Die Autoren

**Holger Alwast**, Geschäftsführer, Alwast Consulting  
**Reinhard Schu**, Geschäftsführer, EcoEnergy, Gesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH

Wiley Online Library



**Alwast Consulting, Berlin**  
 Tel.: +49 30 37 40 29-31  
 alwastholger@gmail.com · www.alwcon.com



# CITplus

Das Praxismagazin für **Verfahrens- und Chemieingenieure**

## Kreislaufwirtschaft mit Tempo und Timing

### Ressourcen schonen mit Recyclinglösungen

Rohstoffe und Recycling sind inzwischen eng miteinander verknüpfte Begriffe und ausreichend Rohstoffe sind die Basis für Industrialisierung und Wohlstand. Prof. Dr. Klaus Kümmerer, Direktor des Instituts für Nachhaltige Chemie, mahnt im Interview, den Gesamtzusammenhang zu sehen, denn wenn das Recycling dem Tempo bei der Herstellung und Weiterentwicklung von Produkten nicht folgen könne, werde nicht recycelt werden. Die Chemie hat viele Schlüssel in der Hand, um mit verfahrenstechnischen Lösungen Ressourcen zu sparen.



Wiley Online Library



#### Weitere Themen

- Mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie, Interview mit Prof. Dr. Klaus Kümmerer **S. 16**
- Recycling von Silikonen ohne Qualitätsverlust **S. 20**
- Nachhaltiger Ruß aus Kautschukrecycling **S. 22**
- Nachhaltige Kraftstoffe **S. 25**
- Für eine umweltfreundliche Abwasserreinigung **S. 28**
- Der Aufstieg von Kohlendioxid als erneuerbare Kohlenstoffquelle **S. 30**



# Mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie



## Keywords

- Kreislaufwirtschaft
- Nachhaltige Chemie
- Grüne Chemie

## Interview mit Prof. Dr. Klaus Kümmerer über die Ziele Nachhaltiger Chemie und die Grenzen der Kreislaufwirtschaft

Prof. Dr. Klaus Kümmerer ist Direktor des Instituts für Nachhaltige Chemie und Inhaber der Professur für Nachhaltige Chemie und Materielle Ressourcen an der Leuphana Universität Lüneburg sowie Director des Research & Education Hub des International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3) in Bonn. Er wurde unter anderem für den „Benign by Design“-Ansatz im Rahmen von „Deutschland – Land der 1.000 Ideen“ vom Stifterverband der Deutschen Wissenschaft ausgezeichnet. Für seine zukunftsweisenden Forschungsleistungen wird ihm am 6. September 2023 der Wöhler-Preis für Nachhaltige Chemie von der GDCh verliehen. Im Interview spricht er über die Bedeutung der Nachhaltigen Chemie für die Kreislaufwirtschaft und wie beides dazu beitragen kann, die großen Herausforderungen jetzt und für die Zukunft zu lösen.

### Herr Professor Kümmerer, wieso ist nachhaltige Chemie wichtig für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft?

**Prof. Dr. Klaus Kümmerer:** Nachhaltige Chemie sieht die Kreislaufwirtschaft in einem größeren Kontext. Sie stellt zuallererst die Frage, welche Funktion oder welchen Service wir haben. Nachhaltige Chemie betrachtet nicht nur einzelne Moleküle, Materialien oder Produkte, sondern die gesamten Stoff- und Materialströme. Darüber hinaus werden auch ethische, soziale und viele weitere Aspekte im Sinne des Sys-

temdenkens betrachtet. Es wird auch gefragt, ob es eine nicht stoffliche Alternative gibt. Für eine funktionierende und langfristig erfolgreich zur Nachhaltigkeit beitragende Kreislaufwirtschaft müssen wir darüber hinaus Stoff-, Material- und Produktströme bezüglich der Vielfalt ihrer Zusammensetzung, ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik und ihrer Größe reduzieren.

Man denke zum Beispiel an die Vielfalt der Polymere, für die zusätzlich bis zu 10.000 Additive verwendet werden. Ein weiteres Beispiel sind Textilien, die meist mehrere Fasern gleich-

zeitig und dazu viele „Ausrüstungs“-Chemikalien enthalten. Wie wollen wir das erfolgreich recyceln!

Grundsätzlich benötigen globale, wachsende Kreisläufe auch mehr Energie, um diese am Laufen zu halten und woraus mehr stoffliche Verluste resultieren. Wenn das Recycling dem Tempo bei der Herstellung und Weiterentwicklung von Produkten nicht folgen kann, wird nicht recycelt werden.

Wir müssen den Gesamtzusammenhang sehen, sonst werden wir weiter das bekom-



men, was wir bereits als Ergebnis der vergangenen 200 Jahre haben: Die Stoff- und Materialströme werden immer größer und komplexer, die Ressourcen aufgebraucht, die Umwelt weiter verschmutzt. Auch für das Recycling wird Energie benötigt und es entstehen wiederum Abfälle, die, wenn überhaupt, nur mit großem Aufwand noch genutzt werden können, aber sicher nicht nochmals rezykliert werden können.

### Welche Rolle spielt dabei Recycling?

**K. Kümmerer:** Recycling ist zweifellos ein wichtiger Baustein, aber eben nur einer von mehreren. Damit es gelingt, muss ich Stoffe, Materialien, aber auch Produkte von Beginn an so designen, damit sie bestmöglich zirkulieren und später recycelt werden können. Und wir müssen anerkennen, dass viele Produkte, die wir nutzen, gar nicht zirkuliert werden können, da sie unvermeidlich in die Umwelt gelangen. Diese müssen so designed sein, dass sie dort nach Erfüllung ihrer Funktion schnell und vollständig abbaubar sind! Bei anderen Produkten gibt es Abrieb, der dazu führt, dass ein Teil infolge der Nutzung unvermeidlich in die Umwelt gelangt. Auch das muss durch Design künftig mehr berücksichtigt werden

### Können Sie Beispiele nennen?

**K. Kümmerer:** Beispiele sind Arzneimittelwirk- und Hilfsstoffe, Tenside, Pestizide oder Bestandteile von Kosmetika, Farben und Beschichtungen von Oberflächen, Bestandteile, die von Produkten abgegeben werden wie zum Beispiel Additive aus Kunststoffen und viele mehr.

### Ist Kreislaufwirtschaft denn ein Schlüssel zur Lösung der globalen Herausforderungen?

**K. Kümmerer:** Kreislaufwirtschaft ist auf jeden Fall ein Teil der Lösung. Wir dürfen aber nicht vergessen, dass sie wie Recycling nicht zum Nulltarif zu haben ist, weder energetisch noch stofflich. Letztlich müssen wir uns eingestehen, dass es – und das sehen wir nur bei systemaren Betrachtungen – kein Upcycling gibt, sondern nur ein Downcycling und damit einhergehende unvermeidliche stoffliche und energetische Verluste. Wir werden am Ende immer etwas verlieren, Stichwort Entropie und Thermodynamik. Das können wir langfristig auch nicht mit immer mehr Energieeinsatz kompensieren, selbst wenn wir diese nachhaltig gewinnen, die ja wiederum auch Produkte zur Gewinnung benötigt, wobei Abfälle entstehen und so weiter. Was wir aber selbst entscheiden können ist, wie wir am wenigsten verlieren und es mit Blick auf die Zukunft jetzt am besten machen.

### Welchen Beitrag leistet nachhaltige Chemie?

**K. Kümmerer:** Als konsequente Weiterentwicklung der grünen Chemie beschäftigt sich nachhaltige Chemie nicht nur damit, Energie und

Abfälle einzusparen, Prozesse und individuelle Chemikalien weniger umweltschädlich zu gestalten und erneuerbare Ressourcen einzusetzen. Nachhaltige Chemie geht weit über diese sehr limitierte Betrachtung der Synthese und einzelner Syntheseprodukte hinaus. Es ist nicht automatisch alles nachhaltig, was eins oder gar alle der zwölf Kriterien der grünen Chemie erfüllt. Und es passt auch nicht automatisch alles in eine Circular Economy.

### Wie sieht das in der Praxis aus?

**K. Kümmerer:** Nehmen wir die Fassade eines Hauses. Durch die Kunststoffe für Dämmung und Farben zum Schutz des Mauerwerks gelangen langfristig auch Stoffe und ihre oft unbekanntesten Produkte des unvollständigen Abbaus ins Grundwasser. Durch die niedrigere Außentemperatur infolge Wärmedämmung wachsen oft Algen oder Pilze auf der Fassade. Anstatt nun Biozide zu verwenden, die ebenfalls schon im Grundwasser nachweisbar sind, könnte man grüne oder graue Farbe verwenden, oder einfach die Verfärbungen akzeptieren. Biozid-freie Fassadenfarben gibt es als Reaktion auf unsere Forschung auch schon auf dem Markt, de facto weniger Inhaltsstoffe aber höherer Preis, da rechnet sich Nachhaltigkeit gleich zweimal. Die Beispiele zeigen, statt nun als erstes daran zu arbeiten, grünere Materialien zu entwickeln, richtet die nachhaltige Chemie den Blick darauf, welche Funktion diese denn erbringen sollen. Eine davon ist der verbesserte Schutz des Mauerwerks und das könnte man beispielsweise auch mit einem größeren Dachüberstand oder Holz, das natürlicherweise fungizide Inhaltsstoffe enthält, erreichen oder einem klassischen mineralischen Putz. Oder man wohnt im Winter bei 18 oder 19 Grad und zieht einen Pullover an, dann braucht es weniger Dämmung, also weniger Material für die gleiche CO<sub>2</sub>-Einsparung.

Ein anderes Beispiel sind Zellulose oder Palmöl. Der Anbau auf kilometerlangen Plantagen in Malaysia benötigt Pestizide, Wasser und Flächen, die in Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung stehen. Nachhaltige Chemie betrachtet die Situation ganzheitlicher und somit auch die Auswirkungen auf Landwirtschaft und die Arbeitsbedingungen. Am Ende steht die Frage, was wir erreichen wollen und ob wir auf dem richtigen Weg sind anstatt einfach mit neuen Stoffen mehr oder weniger schlecht informiert loszustürmen. Wir brauchen mehr Service und Funktionen mit weniger Material und Energie, das ist das Ziel und die Herausforderung. Dieses Denken eröffnet neue Möglichkeiten.

### Welche Kriterien wendet die nachhaltige Chemie darüber hinaus an?

**K. Kümmerer:** Es geht vor allem darum, stoffliche, soziale und ökonomische Rebound-Ef-

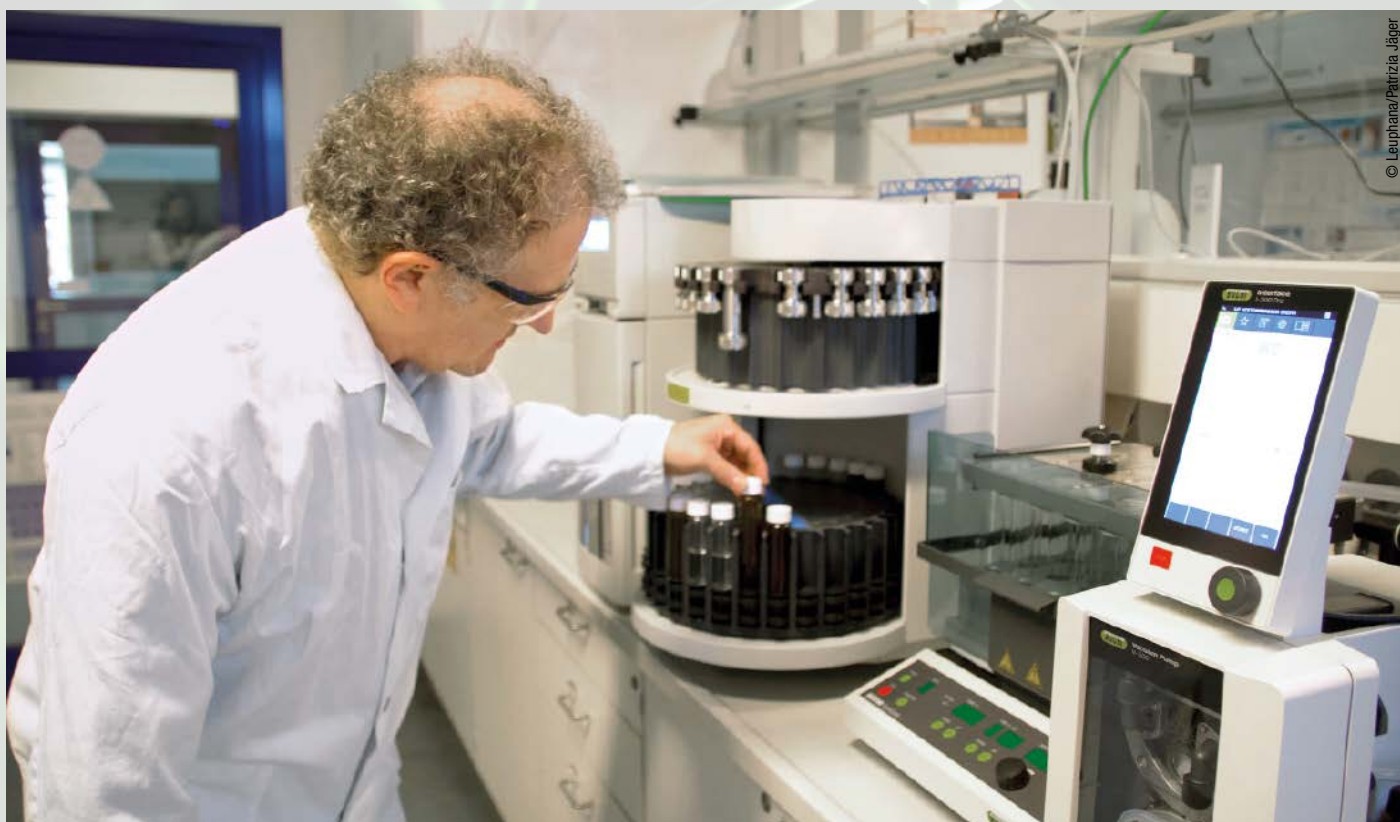
fekte zu vermeiden. Wir entwickeln etwas weiter, ohne zu bedenken, was wir damit langfristig auslösen können. Ein Beispiel sind die Seltenen Erden. Der Einsatz von weniger Material ist grundsätzlich gut und nachhaltig. Wenn das aber am Ende dazu führt, dass das Produkt günstiger wird und der Absatz steigt, mag das zwar aus betrieblicher Sicht und bezogen auf das einzelne Produkt effizienter und gegebenenfalls sogar nachhaltiger sein, mit Blick auf Ressourcenschonung ist aber nichts gewonnen, ganz im Gegenteil. Das Problem des Kunststoffrecyclings aus komplexen Produkten wie dem Auto tritt erst am Ende seiner Lebenszeit, also nach vielen Jahren und eventuell in einem anderen Land auf. Dasselbe gilt aus heutiger Sicht für den Einsatz der PFAS. In meiner Vorlesung kommen sie schon lange vor: Anfangs waren es sechs, dann 20, später 100, vor Kurzem habe ich noch von viereinhalbtausend Verbindungen gesprochen, heute sollen es bis zu 10.000 sein. Dabei wissen wir schon seit mehr als 20 Jahren, dass diese Ewigkeitsstoffe ein Problem sind. Und trotzdem will jeder Outdoorbekleidung wie zum Bergsteigen tragen, auch wenn er nur zu Hause oder in der Stadt unterwegs ist. Wenn wir das Konzept der nachhaltigen Chemie schon gehabt hätten, wären die Probleme mit den PFAS in tausenden Produkten des täglichen Bedarfs dann genauso groß geworden?

### Welche Rolle können und müssen Regierungen weltweit spielen?

**K. Kümmerer:** Wir brauchen ein klares Bekenntnis der Regierungen zu dieser neuen Art von Stoffwirtschaft mit weniger Vielfalt und weniger bewegter Masse. Wir sehen ja, was der Green Deal jetzt schon mobilisiert hat. Zum Beispiel die aktuelle Erprobungsphase des Ansatzes Safe and Sustainable by Design. Das ist ein sehr wichtiges Thema, zu dem aktuell sehr viel geforscht wird.

Die zentralen Fragen lauten: Wie kann man Design im Sinne einer Circular Economy und wie eine Non Toxic Environment Strategie umsetzen, also verhindern, dass giftige Verbindungen in Produkte und die Umwelt gelangen? Wir können natürlich das meist langfristig erfolglose, aber dafür für alle beteiligten teure Spiel von Verbot und Ersatz wie bisher weiter spielen und Ressourcen jeglicher Art damit verschwenden. Eine in vielerlei Hinsicht bessere Möglichkeit wären Positivisten. Das schafft für alle Beteiligten auf allen Ebenen Sicherheit, auch für die Industrie. Das wird etwas Zeit benötigen, aber wenn wir uns jetzt nicht auf den Weg machen, werden wir nie ankommen. Wie war es denn bisher? Wenn ein Stoff verboten werden soll, weil es sich als gefährlich herausstellt, dauert es oft sehr lange, weil viele Akteure mit unterschiedlichen Interessen





© Leuphana/Patrizia Jäger

Nachhaltige Chemie im Fokus. Prof. Klaus Kümmerer in seinem Labor an der Leuphana Universität.

beteiligt sind und es teilweise um viel Geld geht. Und dann kommt ein neuer Stoff auf den Markt, von dem Experten eigentlich alle schon wissen, dass er auch Probleme machen wird. Das Spiel geht von vorne los und es ist nichts gewonnen, gesamtgesellschaftlich schon gar nicht, aber auch für viele Unternehmen nicht. Insbesondere für die Downstream-User nicht, da wieder Produkte verändert und gegebenenfalls zugelassen werden müssen, was auch Zeit und Geld kostet. Flammschutzmittel sind dafür ein gutes Beispiel. Als Chemiker kann ich sagen, dass es auch intellektuell viel reizvoller ist, mit weniger verschiedenen Stoffen mehr zu machen.

#### Wie wichtig sind Initiativen wie das ISC3, um nachhaltige Chemie weltweit voranzutreiben?

**K. Kümmerer:** Sehr wichtig, mit dem International Sustainable Collaborative Center – ISC3 – setzen wir uns für die „Nachhaltige Chemie“ ein und erhoffen uns ein klares Bekenntnis der Regierungen auf der weltweiten Chemikalienkonferenz ICCM5 im September in Bonn. Es geht zum einen darum, das Verständnis für nachhaltige Chemie weiter zu verbreiten, zum anderen darum, die Akteure zu vernetzen. Und genau das sind zwei der Hauptziele des ISC3. Wir haben beispielsweise im ISC3 bereits vor knapp drei Jahren ein Positionspapier\* erarbeitet, um das Konzept der „Nachhaltigen Chemie“ greifbarer zu machen. Denn das Interesse daran nimmt zu, bei jungen Menschen ebenso

wie in der Industrie. Ich muss aber trotzdem sagen: wir stehen noch eher am Anfang.

#### Schauen wir auf Ihre Forschung, was begeistert Sie aktuell besonders?

**K. Kümmerer:** Das sind einerseits die alternativen Geschäftsmodelle, weil sie den Zusammenhang zwischen Bedürfnissen, der Ökonomie und nachhaltiger Chemie zeigen. Die alten Geschäftsmodelle sind angebotsgetrieben, Tonnage bezogen. Die Herangehensweise lautet: Hier ist ein Stoff, wofür kann er verwendet und möglichst viel verkauft werden? In den neuen Modellen geht es mehr Richtung nachfragegetrieben, Service und Wissen bezogen. Im Fokus stehen Antworten auf die Fragen: Was genau ist das Problem? Welche Services und Funktion werden benötigt? Und kann das auch durch eine andere Ausgestaltung zum Beispiel von Prozessen oder ganzen Anwendungsbereichen erreicht werden? Welche Rolle spielt Wissensvermittlung? Wie kann die Kommunikation unter allen Akteuren entlang des gesamten Produktlebenslaufs etabliert oder verbessert werden? Das erfordert ein radikales Umdenken, ein Systemdenken. Entsprechend haben wir dieses Denken in unserer, in Kooperation mit dem ISC3 entwickelten, akademischen Ausbildung an der Leuphana Universität integriert. In diesen weltweit einmaligen berufsbegleitenden Online-Studiengängen Master of Sustainable Chemistry und MBA Sustainable Chemistry Management lehren wir, die richti-

gen Fragen zum richtigen Zeitpunkt zu stellen, um echte nachhaltige Lösungen zu denken.

Als Chemiker weiß ich selbstverständlich, dass Chemie davon lebt, neue Produkte und Moleküle zu entwickeln. Wem das gelingt, der erntet Anerkennung im akademischen Bereich und der Industrie. Aber in Zukunft sollte es öfter darum gehen, wie man ein bestimmtes Molekül vermeiden kann oder für denselben Service weniger benötigt und trotzdem ans Ziel kommt. Genau das sollte belohnt und anerkannt werden und genau das machen wir zum Bestandteil des Studiums.

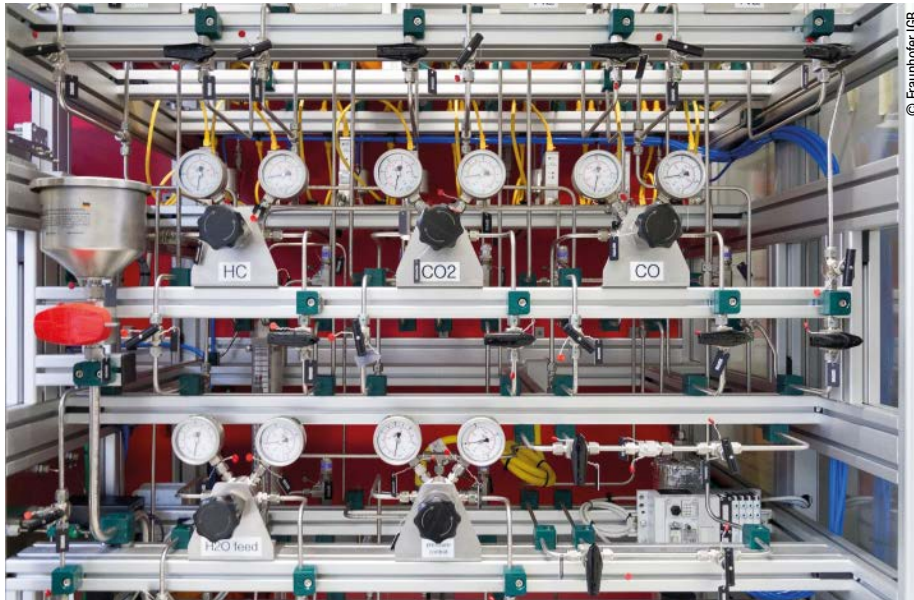
\*Das Positionspapier des ISC3 zur „Nachhaltigen Chemie“ steht unter <https://isc3.org/page/key-characteristics-of-sustainable-chemistry> zum Download bereit

Wiley Online Library



Leuphana Universität, Lüneburg  
 Institut für Nachhaltige Chemie  
 Tel.: +49 4131 677 - 2893  
 klaus.kuemmerer@leuphana.de  
 www.leuphana.de · www.isc3.org

# Biogene Produktionsrouten und PtX-Syntheseprozesse kombinieren



In Power-to-X Verfahren wird Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) durch Reaktion mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff zu hochwertigen Kraftstoffen für Flugzeuge, Schiffe, Lastkraftwagen und Landmaschinen umgesetzt. Die gezeigte Anlage dient der Entwicklung derartiger Verfahren.

Das Zentrum für nachhaltige Kraftstoffe (ZENK) an den Fraunhofer-Instituten IGB in Straubing und UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg hat das Ziel, neue Produktionswege für klimaneutrale Kraftstoffe auf Basis von CO<sub>2</sub>, Biomasse und erneuerbarem Strom zu entwickeln. Die Forschungsarbeiten werden vom Freistaat Bayern mit 11,9 Mio. EUR über einen Zeitraum von vier Jahren gefördert. Im Rahmen des ZENK-Projekts sollen die vorhandenen Vorarbeiten der Fraunhofer-Institute IGB am Institutsteil Bio-, Chemo- und Elektrokatalyse, BioCat, und von Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, im Bereich der nachhaltigen Kraftstoffherzeugung zusammengeführt werden. Hierbei wird eine gekoppelte Technikums- und Entwicklungsinfrastruktur aufgebaut, um den weiteren Weg zur industriellen Anwendung und Markteinführung zu ermöglichen. Unternehmen der petrochemischen Industrie sollen dabei eng eingebunden werden. Im ZENK-Ansatz dient eine Kombination aus biogenen Rest- und Abfallstoffen, Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und erneuerbarer elektrischer Energie als Rohstoffbasis für nachhaltige Kraftstoffe. Die Synthese- und Produktionsrouten für die Verwertung dieser Rohstoffe sollen kombiniert, optimiert und in den Technikumsmaßstab überführt werden. Dabei werden die regionalen Energie- und Einsatzstoffpotenziale berücksichtigt und mögliche Standorte für eine industrielle Umsetzung bewertet. In

der Power-to-X-Route wird am Fraunhofer IGB durch Elektrolyse von Wasser mithilfe erneuerbarer Energie Wasserstoff erzeugt. Dieser wird katalytisch mit Kohlenstoffdioxid zu Methanol umgesetzt. Das Methanol wird über verschiedene Zwischenprodukte zu höheren Olefinen umgewandelt. Diese werden in einem Hydrierprozess zu einem Gemisch aus gesättigten Kohlenwasserstoffen aufgearbeitet, aus denen verschiedene Kraftstoffarten erzeugt werden können. Der Entwicklungsbedarf liegt insbesondere in der Identifikation und Testung stabiler und selektiver Katalysatorsysteme sowie der Anpassung der Anlagenfahrweise an variierende Reinheiten der Einsatzstoffe und an die intermittierende Verfügbarkeit erneuerbarer Energien.

In der Biomasse-basierten Route werden am Fraunhofer UMSICHT aus biogenen Rest- und Abfallstoffen ein wasserstoffreiches Synthesegas, ein Rohöl-Äquivalent und ein kohleähnlicher Feststoff (Biokohle) erzeugt. Um die begrenzten Ressourcen möglichst hochwertig einzusetzen, sollen im Rahmen dieses Vorhabens die Synergien zwischen der Biomasseverwertung und den Power-2-X-Anwendungen – also der strombasierten Kraftstoffherzeugung – identifiziert und gehoben werden. Das aus der Biomasse erzeugte Synthesegas kann in der Methanolsynthese der Power-to-X-Route genutzt werden. Die biogenen Öle können über den vorhandenen Hydrierprozess

zu Kraftstoffen aufbereitet werden. Zusätzlich soll die Versorgung der Methanolsynthese mit möglichst reinem CO<sub>2</sub> über einen Oxyfuel-Verbrennungsprozess der biogenen Prozessgase (Pyrolysegas, Klärgas usw.) erprobt werden. Dieser nutzt wiederum den bei der Elektrolyse anfallenden überschüssigen Sauerstoff. Ein Schwerpunkt der Forschung liegt hierbei auf der Konditionierung der Gase für die weiteren Syntheseschritte.

Die Biokohle, die als Produkt der thermochemischen Biomassekonversion anfällt, spielt eine wichtige Rolle für die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Kraftstoffe. Der darin gebundene Kohlenstoff wird dauerhaft der Atmosphäre entzogen, wodurch eine insgesamt CO<sub>2</sub>-negative Kraftstoffproduktion möglich wird. Das Vorhaben gliedert sich in zwei Projektphasen. In der ersten und bereits abgeschlossenen Phase wurden die Konzeption, Planung und Kommissionierung der Komponenten und Anlagen an beiden Standorten abgeschlossen. In der aktuellen zweiten Phase (Januar 2023 bis September 2026) werden die Prozesse nach der Inbetriebnahme schrittweise miteinander gekoppelt und optimiert.

[www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

Wiley Online Library







## Keywords

- Silikon
- Recycling
- ISC3, Start-up

# Recycling von Silikonen ohne Qualitätsverlust

**Gewinner der ISC3 Innovation Challenge – Technologie des Start-ups New Dawn Silicones spart Energie und CO<sub>2</sub>**

Mit viel Leidenschaft für das Thema Kreislaufwirtschaft, dem Antrieb, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Silikon zu reduzieren und einem richtungweisenden „Magic Fit“, wie sie das Treffen mit Chemiker Stephan Enthaler nennen, haben die Gründerinnen von New Dawn Silicones, Tina Rose und Klara Yoon, eine ressourceneffiziente Recyclingtechnologie entwickelt, mit der Alt-Silikone ohne Qualitätsverlust wiederverwendet werden können.

„Die Ausweitung unserer Grundidee von einem einzelnen Produkt auf das Silikonrecycling für viele Anwendungen kam durch unsere Teilnahme am Circular Economy Incubator des Impact Hub Berlin zustande“, berichten Tina Rose und Klara Yoon: „Wir haben unter anderem Wirkungsberechnungen durchgeführt und sehr schnell gemerkt, dass wir die gesamte Silikonindustrie betrachten müssen, wenn wir unseren ökologischen Fußabdruck verbessern wollen. Mit Stephan Enthaler haben wir schließlich genau die Person getroffen, die in unserem Puzzle noch fehlte. Er hat uns mit seiner Forschung auf dem Gebiet der nachhaltigen Chemie den richtigen Baustein geliefert. Außerdem ist es uns mit Unterstützung des International Sustainable Chemistry Collaborative Centre

(ISC3) gelungen, unsere Idee einem großen globalen Fachpublikum sowie Investoren mit Know-how und Erfahrung über die chemische Industrie hinaus zu präsentieren.“

## Chemisches Recycling vom Labor zur Testanlage

Der Weg von New Dawn Silicones ist nicht der des mechanischen Recyclings, bei dem physikalisch neue Produkte geformt werden, inklusive damit gegebenenfalls einhergehender Qualitätsverluste. Das Start-up setzt auf chemisches Recyclingverfahren, bei dem Alt-Silikone auf molekularer Ebene in kleinere Einheiten zerlegt, gereinigt und am Ende des Prozesses wieder zu neuen hochwertigen Silikonen zusammengesetzt werden. Die Technologie ist

leicht skalierbar und entspricht den Anforderungen einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Chemie. Zusätzlich können die Recyclingsilikone in ihren Eigenschaften für viele Anwendungen maßgeschneidert werden. Es ist theoretisch sogar möglich, aus Silikonabfällen durch chemisches Recycling (Upcycling) hochwertige medizintechnische Produkte zu gewinnen. Der Prozess ist ein wertvoller Beitrag zur ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft, mit Vorteilen bei der Energieeffizienz und dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Darüber hinaus kann das Produkt den Unternehmen helfen, die ESG-Ziele zu erreichen.

„Die Kreislaufwirtschaft ist der Kernpunkt unserer Idee, aber ohne ein Rücknahmesystem nicht möglich. Es ist immer eine Kombina-

tion aus Technologie und Zugang zu Altmaterial“, betont Klara Yoon. Deshalb arbeitet das Start-up an Proofs-of-Concept mit Post-Industrial-Waste in unterschiedlichen Industrien: von Automotive bis zur Medizintechnik.

New Dawn Silicones hat den Laborprozess abgeschlossen und Anfang 2023 zur Patentanmeldung eingereicht. Derzeit ist das Start-up auf der Suche nach Finanzierung für den Bau einer Mini-Test-Anlage, die ab 2024 in Betrieb gehen soll und in der Prozesse optimiert sowie Daten gesammelt werden sollen. Die erste kommerzielle Anlage soll 2026 stehen und bis zu 1.000 t Silikon im Jahr recyceln. Langfristiges Ziel ist es, die Technologie zu lizenzieren und damit die Silikonindustrie von einer linearen zu einer zirkulären umzustellen.

Das Start-up wird für diese Idee im Bereich der nachhaltigen Chemie vom International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3) unterstützt. Es hat die ISC3 Innovation Challenge 2022 des jährlichen Start-up-Wettbewerbs gewonnen und wurde im Januar als ISC3 Start-up of the Month ausgezeichnet.

#### Der Autor

René Sutthoff, Fachjournalist

Wiley Online Library



ISC3, International Sustainable

Chemistry Collaborative Centre, Bonn

contact@isc3.org · www.comsol.de · www.isc3.org



© New Dawn Silicones

„Magic Fit“ für New Day Silicones: Klara Yoon, Stephan Enthaler und Tina Rose (v. li.).

## Covestro digitalisiert die produktspezifische Lebenszyklusanalyse

Um die Kreislaufwirtschaft zu verwirklichen und bis 2035 operativ klimaneutral zu werden, treibt Covestro viele Projekte mit dem Ziel voran, Treibhausgasemissionen einzusparen. Diese Emissionen fallen bei der eigenen Produktion durch den Einsatz von Energie und in der gesamten Wertschöpfungskette an, sowohl vorgelagert bei Lieferanten als auch nachgelagert bei Kunden.

Die Klimaauswirkungen bei der Herstellung der Produkte von Covestro können mit dem Produkt-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von der Wiege bis zum Werkstor (cradle-to-gate) bewertet werden. Er kann spezifisch für ca. 50.000 Zwischen- und Verkaufsprodukte automatisiert berechnet werden. Derzeit validiert der Hersteller die Ergebnisse, um sie für Kunden schrittweise in 2024 zur Verfügung zu stellen. In der Zwischenzeit berechnet Covestro die Daten weiterhin mit Hilfe eines Ökobilanztools und einer im letzten Jahr vom TÜV Rheinland Energy nach ISO 14040/44 und ISO 14067 zertifizierten manuellen Methode. Durch die automatisierte Berechnung kann Covestro den spezifischen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für Produkte des gesamten Produktportfolios ermitteln und Reduktionspotenziale für Treibhausgasemissionen erkennen. Außerdem plant Covestro, seinen Kunden zukünftig die Daten für die Verkaufsprodukte zur Verfügung zu stel-

len, um so zur Emissionsermittlung und einer möglichen anschließenden Emissionsminderung auf Kundenseite beizutragen. Neben dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck können mit der digitalen Lösung auch weitere Umweltwirkungskategorien, wie z.B. das Versauerungspotential oder das photochemische Ozonbildungspotenzial, bewertet werden.



© Covestro

In die Berechnung fließen Emissionen verwendeter Rohstoffe, verbrauchte Energie, generierte direkte Emissionen und Abfallströme, die bei der Herstellung eines Produktes anfallen, ein. Die Berechnungsgrundlage bilden interne anlagen- und standortspezifische Daten von Covestro sowie externe Datenbanken für z.B. Rohstoffe und, wenn vorhanden, spezifische Rohstoff-Daten von Lieferanten.

Die Daten, die berechnet werden, umfassen Zwischen- und Verkaufsprodukte, so dass die gesamte Wertschöpfungskette für die Produkte bis zum Covestro Tor berücksichtigt wird. „Wir alle möchten und müssen Emissionen entlang der Wertschöpfungskette reduzieren – das gilt für uns bei Covestro genauso wie für unsere Lieferanten und Kunden. Die Anforderungen unserer Kunden sind klar: Daten für alle unsere Produkte zur Verfügung zu stellen und Optionen zur Emissionsreduzierung zu identifizieren“, erläutert Lynette Chung, Chief Sustainability Officer bei Covestro.

Covestro ist nun in der automatisierten Berechnung einen großen Schritt weitergekommen. Informationen zu den Material- und Energieverbräuchen werden aus vorhandenen Datenquellen und Systemen, wie Enterprise Resource Planning (ERP), gezogen und mit Daten aus Datenbanken in der Cloud zusammengeführt. Dazu nutzt Covestro die Product Sustainability Platform von Allocnow. Das Softwareunternehmen ist spezialisiert auf die automatisierte Berechnung von Ökobilanzen für chemische Produkte. Zukünftig können weitere Lieferanten-Daten in der Berechnung berücksichtigt werden.

www.covestro.com



# Nachhaltiger Ruß

## Verfahrenstechnische Betrachtung der Recovered-Carbon-Black-Produktion



© sangsiri/pech - stock.adobe.com



### Keywords

- **Ruß, recovered Carbon Black**
- **Pyrolyseverfahren**
- **Status und Marktchancen**

Recovered Carbon Black (rCB) wird durch Pyrolyse vor allem aus Altreifen gewonnen. Carbon Black ist ein schwarzer Pigmentstoff, der auch als Verstärker in Kautschukmischungen eingesetzt wird. Die Gummi-, Kunststoff- und Druckindustrie sind potenzielle Abnehmer von rCB. Reifenhersteller könnten rCB bspw. in der Produktion von Reifen einsetzen, um deren Nachhaltigkeit zu verbessern. Die Nachfrage steigt und die Pyrolyseverfahren werden weiter optimiert.

Recovered Carbon Black ("rCB"<sup>[1]</sup>), in Deutschland auch Reifenpyrolyseruß oder Pyrolyseruß genannt, ist ein vor allem in der Reifenindustrie gefragter nachhaltiger, halbverstärkender Füllstoff, der aus Altreifen gewonnen wird. Die Nachfrage nach recovered Carbon Black wird auf 1 Mio. Jahrestonnen bis 2032 eingeschätzt<sup>[2]</sup>.

### Recovered Carbon Black wird in einem sechsstufigem Prozess hergestellt:

- Auswahl einer geeigneten Altreifen-Rohstoffmischung,
- Schreddern, Granulieren und Waschen der Altreifen-Rohstoffmischung,
- Pyrolyse des Granulates (Aufspaltung des Altreifengranulats in Gas, Öl und Feststoffrückstand ("roher recovered Carbon Black")),
- Feinstvermahlen des Feststoffrückstands,
- Pelletieren des vermahlenden recovered Carbon Blacks,
- Trocknen des granulierten recovered Carbon Blacks

### Produktzusammensetzung

Recovered Carbon Black enthält vor allem die verschiedenen Industrieruße, die in den unterschiedlichen Gummimischungen der ausgewählten Altreifen enthalten sind<sup>[3]</sup>. Die in den

ausgewählten Altreifen enthaltenen anorganischen Bestandteile, z.B. Zink als Zinksulfid und der mineralische Füllstoff Kieselsäure und andere mineralische Füllstoffe verbleiben ebenfalls im Feststoffrückstand. Abhängig von den Pyrolysebedingungen<sup>[4]</sup> kommen zwei organische Bestandteile dazu: organische, flüchtige Bestandteile aus der Polymerzersetzung der Pyrolyse, die nicht verdampft wurden sowie auch elementarer Kohlenstoff aus der Polymerkarbonisierung in der Pyrolyse.

Damit stehen auch die beiden wichtigsten Prozesskontrollmechanismen für die recovered Carbon-Black-Produktion fest: Die Auswahl der Altreifen und die Prozessbedingungen in der Pyrolyse.

### Anwendungen von recovered Carbon Black

Als Anwendung liegt vor allem die Verstärkung von Gummimischungen in Neureifen nahe. Dies ist nicht nur eine zirkuläre Anwendung, sondern auch der größte Markt für sowohl recovered Carbon Black und Industrieruß. Da recovered Carbon Black eine Mischung unterschiedlicher Industrieruße enthält, deren Oberfläche zudem teils von elementarem Kohlenstoff ("Koks") und von anorganischen Bestandteilen inaktiviert ist, kann nur eine halbverstärkende Leistung in Gummianwendungen erwartet werden. Ein guter recovered Carbon Black kann daher vor

allem halbverstärkende Industrieruße wie z.B. einen N772 in Gummiteilen oder einen N660 in Reifenkarkassen ersetzen.

### Status der rCB-Industrie

Reifenpyrolyseanlagen gibt es schon seit der Ölkrise in den 80er Jahren. Aber erst die industrielle Kommerzialisierung von recovered Carbon Black, immerhin etwa 40 % der Massebilanz, machte es möglich, diese Anlagen auch profitabel zu betreiben. Während in den 80er Jahren nur das Pyrolyseöl als billiger Treibstoff interessant war, ist mittlerweile recovered Carbon Black der profitable "Moneymaker" einer Pyrolyseanlage. Auch das Pyrolyseöl wird heutzutage vorwiegend stofflich verwertet als Rohstoff für die Polymerproduktion oder auch als zirkulärer Rohstoff für die Produktion von Industrieruß.

Hier gibt es erfolgreiche Synergien, weil die Produzenten von Industrieruß sowohl Pyrolyseöl als Rohstoff kaufen, als auch recovered Carbon Black, der dort in Mischungen mit Industrieruß Einsatz findet. Diese Mischungen bieten den Kunden zum einen grüne Aspekte wie reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen und recycelte Anteile und zum anderen eine garantierte Verstärkungsleistung in Gummi, sowie die zuverlässige Lieferkette der etablierten Produzenten von Industrieruß.



Während weltweit bisher nur eine Handvoll Firmen existieren, die schon auf Industrieproduktion skaliert haben, bauen derzeit viele Unternehmen Anlagen, die in 2025 in Betrieb genommen werden. Wolfersdorff Consulting Berlin und Notch Consulting, USA, spezifizieren die globale Produktionskapazität von recovered Carbon Black in 2023 auf etwa 100.000 Jahrestonnen und schätzen, dass die Produktionskapazität in 2025 auf über 380.000 Jahrestonnen steigen wird<sup>[5]</sup>.

Wichtig für die recovered Carbon-Black-Industrie ist ein Paradigmenwechsel der Betreiber. Während das typische Recyclinggeschäft opportunistisch, ökonomisch und kurzfristig motiviert ist, baut die Geschäftsgrundlage für recovered Carbon Black auf eine kontrollierte technische Produktion, Ökologie und Nachhaltigkeit.

### Technologieentwicklung Pyrolyse

Obwohl die Pyrolyse nur einen kleinen Teil der Qualitätssicherung für recovered Carbon Black darstellt, gibt es hier aber den größten Technologiefortschritt. Die anderen technischen Prozessschritte des Verfahrens wie Granulierung, Vermahlung, Pelletieren und Trocknen sind eher Standardoperationen für deren Maschinen es genügend Auswahl gibt.

Während anfangs nur Drehrohröfen für die Reifenpyrolyse eingesetzt wurden, kamen ab dem Jahr 2000 vor allem Schneckenreaktoren auf den Markt. Für Forschungszwecke in Laboratorien und Universitäten werden dank der effizienten und turbulenten Wärmeübertragung gerne Wirbelschichten für Pyrolyseoperationen eingesetzt. In der Industrie gibt es ein Unternehmen, das dieses Verfahren seit mehr als zehn Jahren einsetzt. Diese Firma war auch die erste Firma, die mit einem Produzenten von Industrieruß zusammenarbeitet, dank der guten Qualität des recovered Carbon Blacks.

Für die Produktion von recovered Carbon Black und für die Reifenpyrolyse im Allgemeinen haben sich vor allem auf Reifenpyrolyse spezialisierte Technologien durchgesetzt. Dies liegt zum einen am Trend zu schlüsselfertigen Anlagen und zum anderen am Interessenkonflikt der beiden Hauptprodukte der Reifenpyrolyse.

Für Pyrolyseöl sind mäßige Temperaturen optimal, da schweres Pyrolyseöl hochwertiger ist als leichtes. Recovered Carbon Black hingegen benötigt hohe Temperaturen, damit die organischen flüchtigen Bestandteile entfernt werden können. Daher kommen in der recovered Carbon-Black-Industrie hauptsächlich mehrstufige Systeme zum Einsatz, die beide Produkte zu den optimalen Prozessbedingungen herstellen können.

Die niederländische recovered Carbon Black Firma Black Bear Carbon hatte eine zweistufige Drehrohrpyrolyse in Betrieb. Die britische Firma Cirtec betreibt in Polen eine zweistufige Wirbelschichtpyrolyse. Die Start-up-Firma BB&G in Portugal hat einen dreistufigen Schneckenreaktor entwickelt und baut gerade eine Technikumsanlage.

Als ab 2015 einige Start-up-Firmen Mikrowellentechnologien für die Reifenpyrolyse entwickelten, sah es so aus, als ob diese Technologie im Kommen sei. Die Vorteile liegen auf der Hand, mit Mikrowellen kann man den Isolator Gummi von innen heraus durch Anregung der Kohlenstoffatome und des Stahlanteils erhitzen. Durch Einkauf von grünem Strom kann die Mikrowellenpyrolyse mit sehr geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen betrieben werden. Dies wäre ein großer Marktvorteil. Leider konnten diese Firmen bis heute nicht in der Industrie Fuß fassen, vor allem weil sie keine Produktentwicklung für recovered Carbon Black vorangetrieben haben. Langfristig werden sich nur solche Pyrolysetechnologien durchsetzen, die eine hohe Energieeffizienz haben.

### Schlüssel- und neue Technologien

Eine Schlüsselaufgabe haben die der Reifenpyrolyse nachgeschalteten Kondensatoren, die aus den im Reaktor entstehenden Pyrolysegasen die kondensierbaren Gase als Pyrolyseöl abspalten. Im Kondensator entscheidet sich auch, in welchen Massenstrom der Schwefel geht. Kondensatoren, die es vermögen, den Schwefel vorwiegend im Pyrolysegas zu belassen, erzeugen so ein schwefelarmes und damit wertvolles Pyrolyseöl.

Sehr oft kommt die Frage nach Technologien zum Reduzieren des Aschegehalts von recovered Carbon Black auf. Hier gibt es Anbieter, aber noch keine Zuverlässigen, die Industriereife erreicht haben. Zudem gründen die meisten Verfahren auf der Extraktion mit Säuren oder Basen und erzeugen somit Abfallströme, welche schwer zu kommerzialisieren sind.

Die recovered Carbon-Black-Industrie ist dabei, industrielle Kapazitäten aufzubauen. Prozesstechnisch sind vor allem in der Pyrolyse neue Entwicklungen zu erwarten, die die Energieeffizienz erhöhen.

### Referenzen

- [1] Die Namensgebung, sowie das Akronym "rCB" ist in der ASTM Norm D8178 "Standard Terminology Relating to Recovered Carbon Black (rCB) festgelegt.
- [2] Wolfersdorff Consulting Berlin, Notch Consulting Inc. Industrierferenzbericht "Prospects for recovered Carbon Black 2023"
- [3] Reifen enthalten ca. 20-30% Industrieruße, z.B. Karkassenruße N660 und N550 sowie Laufflächenruße N339, N330 und der Felgenbandruß N326
- [4] Vor allem Granulatgröße, Pyrolysetemperatur und Verweilzeit
- [5] Wolfersdorff Consulting Berlin, Notch Consulting Inc. Industrierferenzbericht "Prospects for recovered Carbon Black 2023"



Aus der Pyrolyse von Altreifen lassen sich wertvolle Rohstoffe, wie Ruß wiedergewinnen.



**Der Autor**  
**Martin von Wolfersdorff,**  
Wolfersdorff Consulting

Wiley Online Library



**Wolfersdorff Consulting, Berlin**  
Certified Coach (EASC), Expert for tire-to-tire recycling, recovered Carbon Black, Sustainability Coaching  
Tel.: Mobile +49 151 26874623  
martin@wolfersdorff.com · www.wolfersdorff.com

## Auf dem Weg zum geschlossenen Kreislauf für PU-Matratzen

Nach dem Ende des europaweiten Forschungsprojekts PUReSmart freuen sich Covestro und das federführende Unternehmen Rectical über das positive Ergebnis. Sie konnten zeigen, dass die beiden ursprünglich eingesetzten Hauptrohstoffe von Polyurethan (PU)-Weichschaum aus Matratzen auf chemischem Wege und in hoher Qualität und Reinheit zurückgewonnen werden können. Erstmals wurde jetzt ein Weichschaum-Muster aus jeweils vollständig recyceltem Polyol und Toluol-Diisocyanat (TDI) hergestellt. „Damit haben wir das Ziel, eine Technologie zu entwickeln, um diese Produkte chemisch zu recyceln und Polyurethan in ein hochwertiges Recyclingmaterial umzuwandeln, vollständig erreicht“, sagt Bart Haelterman, F&E-Direktor bei Rectical. „Zum ersten Mal in der Geschichte wird Polyurethan wirklich in eine Kreislaufwirtschaft integriert.“ Die Europäische Union förderte das PUReSmart Projekt über einen Zeitraum von vier Jahren mit 6 Mio. EUR im Rahmen ihres Forschungs- und Innovationsprogramms „Horizon 2020“. Aufbauend auf dem PUReSmart Projekt treibt Covestro gemeinsam mit Partnern aus der Entsorgungswirtschaft die weitere Entwicklung des Weichschaumrecyclings bis zur industriellen Nutzung voran. „Unser Ziel ist es, Abfälle in wertvolle Rohstoffe zu verwandeln und dazu das Prinzip



der Kreislaufwirtschaft in unserem Unternehmen und entlang der Wertschöpfungskette mit unseren Partnern zu verankern“, sagt Christine Mendoza-Frohn, Head of Performance Materials Sales in den Regionen EMEA und LATAM bei Covestro. Im Unterschied zu anderen chemischen Prozessen für das Recycling von PU-Matratzenschaum kommt das Verfahren ohne die Verwendung von fossilbasiertem Polyol aus.

Es benötigt nur den vorsortierten Schaum aus Matratzenabfällen, ein Glykol und ein Additiv. Bei der Chemolyse werden das Polyol sowie Toluol-Diamin (TDA), die Vorstufe zu TDI, in hoher Reinheit und Ausbeute wiedergewonnen. Sie können nach Aufbereitung wieder beliebig oft für die Herstellung neuer PU-Weichschäume eingesetzt werden.

[www.covestro.com](http://www.covestro.com)

## Neues Werk für die Verarbeitung von biogenem Kohlendioxid in Sachsen-Anhalt

Nippon Gases Deutschland, eine europäische Tochtergesellschaft der Nippon Sanso Holdings Corporation (NSHD), kooperiert zur Gewinnung von biogenem CO<sub>2</sub> zukünftig mit Verbio Vereinigte BioEnergie. Der Industriegase-Spezialist Nippon Gases investiert dafür in den Bau einer modernen Anlage zur Reinigung und Verflüssigung von CO<sub>2</sub> aus der Bioethanolproduktion von Verbio am Standort Zörbig und errichtet in nächster Nachbarschaft ein Werk für die Weiterverarbeitung des CO<sub>2</sub> zu Trockeneis. Kürzlich

unterzeichneten die beiden Unternehmen eine entsprechende strategische Vereinbarung. Die Zusammenarbeit ist in mehrfacher Hinsicht ideal für Nippon Gases. „Durch die zentrale Lage des Standorts in Deutschland, reduzieren wir einerseits die Transportwege zu einem großen Teil unserer Kundschaft“, erläutert Christian Beck, verantwortlich für die Entwicklung des Projekts, „zum anderen erhöhen wir die Verfügbarkeit unserer Produkte durch die Diversifizierung unserer CO<sub>2</sub>-Bezugsbasis auf Quellen, die nicht

vom Erdgaseinsatz abhängig ist.“ Das bietet Kunden eine verbesserte Versorgungssicherheit und kommt zudem der Umwelt zu gute. Dank der kurzen Distanz zwischen Verflüssigung und Weiterverarbeitung zu Trockeneis verringert sich der Straßentransport von Flüssigkohlendioxid um jährlich bis zu 380.000 km. „Mit der daraus resultierenden Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von bis zu 330 t pro Jahr, leisten wir einen weiteren wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit der gesamten Wertschöpfungskette“, ergänzt Beck. Auch Verbio-Vorstand Prof. Dr. Oliver Lüdtker freut sich über die Zusammenarbeit mit Nippon Gases: „In unseren Verbio-Bioraffinerien optimieren wir kontinuierlich den Ressourceneinsatz, die Energieeffizienz und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Bereits heute werden die von uns eingesetzten Rohstoffe in mehreren Prozessstufen nahezu vollständig verwertet.“

[www.nippongases.com](http://www.nippongases.com) · [www.verbio.de](http://www.verbio.de)



Wiley Online Library







# Nachhaltige Kraftstoffe

Verfahren zur Erzeugung von klimaneutralen Kraftstoffen aus Klärschlamm



Abb. 1: Übersicht des Großdemonstrators in Hohenburg



## Keywords

- **Nachhaltigkeit**
- **Kraftstoffe**
- **Biomasse**

Im Projekt To-Syn-Fuel wurde ein vom Fraunhofer Institut Umsicht entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Kraftstoffen aus Biomassereststoffen im Demonstrationsmaßstab umgesetzt. Während der Laufzeit wurden aus 500 t Klärschlamm mehr als 50.000 L biogenes Rohöl gewonnen. Hieraus können in Summe 40.000 L Benzin, Diesel und Kerosin entstehen. Der Standort des Großdemonstrators ist Hohenburg im Landkreis Amberg-Sulzbach/Bayern.



Abb. 2: Pyrolyse-Reaktor mit Post-Reformer

Erstmals konnte im großtechnischen Maßstab demonstriert werden, wie sich biogene Rest- und Abfallstoffe über einen erweiterten Pyrolyseprozess in thermisch stabile, flüssige Bioöle umwandeln lassen. Zum Abschluss des Projekts To-Syn-Fuel legte ein VW-Passat mit handelsüblicher Dieselmotorisierung mit dem hergestellten Kraftstoff mehr als 2.000 km durch Europa zurück.

## Das TCR-Verfahren (Thermo-Katalytisches Reforming) und seine Produkte

Die Kerntechnologie, die im To-Syn-Fuel-Projekt zum Einsatz kam, ist das von Fraunhofer entwickelte TCR-Verfahren (Thermo-Katalytisches Reforming). Der Prozess basiert auf einer intermediären Pyrolyse und wird kombiniert mit einer nachgeschalteten katalytischen Reforming-Einheit. Der Pyrolyseschritt erfolgt bei Temperaturen von 400 bis 500 °C bei einer moderaten Heizrate von 200 bis 300 °C/min.





Abb. 3: Gas- bzw. Dampfstrecke

Die Biomasse wird dabei in einem kontinuierlich arbeitenden Schneckenreaktor (Abb. 2) unter Sauerstoffabschluss schonend in Feststoffe (Karbonisat) und flüchtige Bestandteile zerlegt. Die Bildung von Teer und anderen Schadstoffen wird durch optimierte Prozessbedingungen in den verschiedenen Reaktorzonen vermieden. Im nachgeschalteten Reforming-Schritt wird das im Pyrolysereaktor entstandene Karbonisat bei Temperaturen von 500 bis 700 °C gezielt mit den Pyrolysedämpfen in Reaktion gebracht. Hauptziel des Reforming-Schrittes ist das Cracken der Dämpfe, um die Qualität und Ausbeuten der Pyrolyseprodukte zu verbessern sowie gezielt die Wasserstoffausbeute zu maximieren.

Der reformierte Prozessdampf wird gereinigt und abgekühlt, sodass eine Öl-Wasser-Mischung auskondensiert (Abb. 3). Das Wasser wird abgezogen und es verbleibt ein Bio-Rohöl, ähnlich einem fossilen Mineralöl mit hohem Heizwert sowie niedrigen Säurewerten (vergleichbar mit pflanzlichen Ölen). Das restliche, wasserstoffreiche Produktgas (bis 50 % Wasserstoffgehalt je nach Einsatzstoff und Reaktionsbedingungen) wird weiter aufgereinigt und kann für Synthesen genutzt werden. Es eignet sich auch für die energetische Nutzung auf einem BHKW oder als Energieträger für die Beheizung des Pyrolyseprozesses.



Abb. 4: Druckwechseladsorption

Beim Karbonisat handelt es sich um einen stabilen Feststoff mit niedrigen Sauer- und Wasserstoffanteilen und hohem Kohlenstoffgehalt (je nach Einsatzstoff). Da das Karbonisat neben dem Kohlenstoff noch die mineralischen Komponenten des Einsatzstoffs beinhaltet, kann es in Böden eingebracht werden, sofern der Einsatzstoff nicht schadstoffbelastet ist. Der im Karbonisat enthaltene Kohlenstoff wird dann dauerhaft der Atmosphäre entzogen. Wird der Kohlenstoff auf diese Weise sequestriert, bekommen die Produkte, also das Öl und das Gas eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz. Im Falle einer solchen Kohlenstoffsequestrierung handelt es sich um einen so genannten „Bioenergy Carbon Capture and Storage BECCS“-Prozess. Je nach Einsatzstoff und Anwendungsszenario sind auch energetische Anwendungen der Kohlen möglich bspw. in einem Vergasungsprozess.

### Der Hydrierprozess

Im To-Syn-Fuel Projekt wurden die Öle aus dem TCR-Prozess im Rahmen einer technischen Machbarkeitsdemonstration direkt vor Ort über einen Hydrierprozess weiterverarbeitet. Für die Hydrierung wurde der im Synthesegas enthaltene Wasserstoff genutzt. Dieser wird über eine Druckwechseladsorption (Abb. 4) aus der Gasphase der TCR-Produkte gewonnen. Dafür wird das Produktgas aus dem TCR-Prozess zunächst durch einen Synthesegasverdichter auf bis zu 12 bar verdichtet. In der PSA wird der Wasserstoff von den anderen Spezies (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>), dem so genannten Off-Gas, getrennt. Der Wasserstoff wird komprimiert und in einem Speicher gepuffert und steht so der Hydrierreaktion zur Verfügung. Das verbleibende Off-Gas kann in einem Blockheizkraftwerk energetisch genutzt werden.

Die Hydrieranlage (Abb. 5) im To-Syn-Fuel Projekt ist auf einen Durchsatz von 30 L TCR-Öl pro Stunde ausgelegt. Die aus dem Prozess gewonnen hydrierten Öle erfüllen bei entsprechender Weiterverarbeitung die wichtigsten Normanforderungen für Benzin (EN 228) und Diesel (EN 590). Sie sind daher mischbar mit





herkömmlichen Kraftstoffen und lassen sich ohne Motorumbauten bei gleicher Leistung einsetzen. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck je gefahrenem Kilometer reduziert sich um über 85 %. Wird der feste Kohlenstoff, der im Herstellungsprozess anfällt, eingelagert, lassen sich bilanziell CO<sub>2</sub>-negative Kraftstoffe erzeugen. Die im Fraunhofer TCR-Verfahren hergestellten Öle können auch in konventionellen Raffinerieprozessen als Drop-In-Öle weiter- oder mitverarbeitet werden. So lässt sich neben Kraftstoffen das gesamte Produktspektrum einer Raffinerie erzeugen, z.B. Chemikalien und Zwischenprodukte für Kunststoffe mit einem reduzierten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck.

### Verschiedene Anwendungsfelder des Verfahrens

Die Fraunhofer-Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Herstellungskosten für den alternativen Kraftstoff je nach Größe der Produktionsanlage, der Art des Endprodukts und der Besteuerung mit denen fossiler Kraftstoffe vergleichbar sein könnten. Sie würden damit oberhalb von Ethanol und Biodiesel aus Energiepflanzen, aber unterhalb anderer alternativer Kraftstoffe bspw. aus Power-to-X Verfahren liegen. Im Gegensatz zu herkömmlichem Biodiesel stehen sie nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion.

Neben Klärschlamm sind im TCR-Verfahren auch andere biogene Rest- und Abfallstoffe verwertbar. Das Team von Fraunhofer hat im Labormaßstab inzwischen über 70 Einsatzstoffe verprobt, z.B. Gärreste, Gülle, Bioabfälle oder Minderholz. Nach Berechnungen von Fraunhofer liegt das technische Potenzial solcher Rest- und Abfallstoffe allein in Deutschland bei mehreren Millionen Tonnen. Ein zusätzlicher Vorteil bei der dezentralen Verwertung von Abfällen: die Entsorgungskosten für die kommunalen Haushalte könnten gesenkt werden.

Flüssige Energieträger und Rohstoffe aus fossilen Quellen machen in Deutschland aktuell noch ca. 98 % der Antriebsenergie im Verkehr und 22 % der Heizenergie aus. 16 % des



Abb. 5: Hydrieranlage

Mineralölaufkommens wird darüber hinaus in der Chemieindustrie verwendet. Einige Wirtschaftsbereiche werden auch in Zukunft auf flüssige Energieträger mit hoher Energiedichte bzw. hochwertige Kohlenwasserstoffe angewiesen sein, z.B. der Flugverkehr, die Schifffahrt oder die chemische Industrie. Kraftstoffe und Rohstoffe auf Basis von Biomasse und Reststoffen können für diese Anwendungen eine wichtige Ergänzungsfunktion einnehmen, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Vor allem dann, wenn sie aus biogenen Abfallstoffen hergestellt werden, so dass ihre Produktion nicht mit der Nahrungsmittelproduktion konkurriert und eine Teller-vs.-Tank-Diskussion vermieden wird. Die EU Kommission strebt für den Zeitraum nach 2020 eine schrittweise Einstellung der Verwendung konventioneller Biokraftstoffe der ersten Generation („Biodiesel“) an und legt ein Mindestziel für fortgeschrittene Biokraftstoffe im Verkehr fest. Die Fraunhofer Forscher sehen als Anwendungsgebiet der TCR-Technologie vor allem Bereiche der Mobilität, die kurzfristig schwer elektrifizierbar sind. Hier könnten schnell Emissionen eingespart werden. Die Neufassung der EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) sieht zudem vor, dass der Mindestanteil an fortschrittlichen Bio-Kraftstoffen (d.h. zum Beispiel auf Basis von Abfall- und Reststoffen) von 0,1 % im Jahr 2021 auf 1,75 % im Jahr 2030 steigen soll.

### Ausblick

Die Forschung und Entwicklung zur TCR-Technologie soll weitergehen: aktuell beschäftigen sich die Forscher intensiv mit der Nutzung der Kohle, der Verbesserung der Wasserstoffausbeute und der Gewinnung von Ammoniak aus stickstoffreichen Einsatzstoffen. Die erste

industrielle Anwendung der Technologie ist ebenfalls in Planung: Die Raffinerie Bayern-oil will die Fraunhofer-Technologie in größerem Maßstab umsetzen und beabsichtigt bis spätestens 2030 bis zu 400.000 t (100.000 t Trockensubstanz) Klärschlamm zu verarbeiten. Das wären rund 40 % des Klärschlamm-aufkommens in Bayern. Erzeugt werden daraus vorrangig nachhaltige Flugkraftstoffe. Das Projekt To-Syn-Fuel wurde im Rahmen eines EU-Vorhabens (11 europäische Partner) mit 12,5 Mio. EUR gefördert.

### Die Autoren



**Dr. Ing. Robert Daschner,**  
Abteilungsleiter Energie-  
technik, Fraunhofer Umsicht,  
Institutsteil Sulzbach-  
Rosenberg



**Dr. Andreas Apfelbacher,**  
Gruppenleiter Thermo-  
chemische Prozesse,  
Fraunhofer Umsicht, Insti-  
tutsteil Sulzbach-Rosenberg

Wiley Online Library



Fraunhofer UMSICHT –  
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg  
robert.daschner@umsicht.fraunhofer.de  
Tel.: +49 9661 8155-410  
www.umsicht-suro.fraunhofer.de



# Für eine umweltfreundliche Abwasserreinigung

Reaktivierung von gebrauchter Aktivkohle der 4. Abwasser-Reinigungsstufe

Im Wirbelschichtverfahren lässt sich ein homogenes Reaktivierungsergebnis der gebrauchten Aktivkohle erzielen.

**Keywords**

- Aktivkohle, GAK, Filter
- Kreislauf, Reaktivierung
- Abwasserreinigung

Der großtechnische Einsatz von granulierter Aktivkohle (GAK) in der 4. Reinigungsstufe ist im Vergleich zur Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK) nur in geringem Umfang in der Abwasserreinigung verbreitet. Dabei liegen die Vorteile einer wiederholten Reaktivierung und der damit verbundenen mehrfachen Wiederverwendung im Sinner einer umweltfreundlichen Kreislaufführung auf der Hand.

In einer Kläranlage der Größenklasse IV wird die 4. Reinigungsstufe mit vier parallel geschalteten Festbettfiltern betrieben. Die vier drucklos betriebenen Filterbehälter sind einer Filtrationsstufe nachgeschaltet, CarboTech lieferte je Filter 40 m<sup>3</sup> auf Steinkohle basierte GAK. Die Filter werden unabhängig voneinander regelmäßig im Intervall von 18 bis 20 Tage zurückgespült. Die Rückspülung erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird mit Luft zurückgespült, darauf folgt ein zweiter langsamerer Spülgang mit Wasser. Abschließend erfolgt eine schnelle Rückspülung mit Wasser, bei einer Betausdehnung von ca. 20 %. Die Rückspülungen werden rein prophylaktisch durchgeführt, wobei kein Anstieg des Druckverlustes im Filterbett festgestellt werden konnte. Diese Verfahrensweise ist in dem zwei Jahre andauerndem Betrieb bestens praxiserprobt. Die geforderte Elimination von Mikroschadstoffen > 80 % ist permanent erfüllt.

genen Labor von CarboTech beprobt. Dazu wurde eine nasse Probe der gefahrenen GAK in zwei Stufen in inerter Atmosphäre erhitzt und der Masseverlust bestimmt. Nach der zweiten Stufe erfolgte die komplette Oxidation der Probe, um den Aschegehalt zu bestimmen. Analyseparameter sind neben der Rütteldichte, die Jodzahl, der Masseverlust und zusätzlich andere Parameter, wie z.B. die Benzolisothermen. Im Nachgang erfolgte die Reaktivierung im eigenen CarboTech-Produktionsstandort in Essen und die Rückführung in die Kreislaufwirtschaft.

Anhand der Vergleichswerte nach jeder Stufe zum Ausgangsmaterial (Frischkohle) lassen sich Rückschlüsse auf die erzielbare Qualität der GAK nach der Reaktivierung ziehen.

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist ein Auszug der Ergebnisse zu

der erschöpften GAK aus dem Klärwerk zu sehen. Durch das Erhitzen der Probe (Desorbieren) hat die Rütteldichte noch nicht ihren Ausgangswert erreicht, nur ein Anteil der Beladung (Sorbitive) ist leicht aus der GAK zu entfernen. Somit muss ein weiterer Anteil der Beladung gezielt durch die Reaktivierung oxidiert werden. Diese Beobachtung bestätigt die Veränderungen der Jodzahl, der hohe Masseverlust im ersten Desorptionsschritt (150 °C) wird zum größten Teil durch anhaftendes Wasser verursacht. Der weitere Masseverlust im zweiten Desorptionsschritt repräsentiert die Beladung, die sich rein durch thermische Energie desorbieren lässt.

**Reaktivierung durch Wirbelschichtverfahren**  
Zusammengefasst bringt diese erschöpfte GAK alle Parameter für eine Reaktivierung mit. Die

Tab. 1: Auszug aus den Ergebnissen der Voruntersuchung zur Überprüfung der Reaktivierung der erschöpften GAK

Aktivkohle	Rütteldichte [g/l]	Iodzahl [mg/g AK]	Masseverlust [%]
erschöpfte GAK	900	900	
desorbiert, 15 h @ 150 °C	450	550	ca.50
desorbiert, 0,5 h @ 900 °C	400	850	ca. 10

## Aktivkohle im Kreislauf führen

Im Praxistest wurde ein Bett-Volumen (BV) von 23.000 bzw. 25.000 erzielt, bis die GAK vollständig erschöpft ist. Die erschöpfte GAK wurde im Anschluss im einem der hausei-

Aktivkohle qualifiziert sich damit für die Kreislaufwirtschaft und den damit verbundenen Mehrfacheinsatz mehr als deutlich.

Um ein homogenes Reaktivierungsergebnis zu erzielen, wird die Aktivkohle vorgetrocknet und rieselfähig in den Wirbelschichtofen eingetragen. Dort wird die Aktivkohle fluidisiert und weiter getrocknet. Zudem findet die Vergasung von amorphem Kohlenstoff unter optimalen Bedingungen statt. In der Wirbelschicht herrscht ein turbulenter Gasstrom, dieser produziert einen sehr effizienten Stoffaustausch zwischen den Edukten (fester Kohlenstoff; Wasserdampf), wodurch die chemische Reaktion homogen an vielen Stellen im GAK-Partikel stattfinden kann. CarboTech setzt das Wirbelschichtverfahren am Standort in Essen ein. Ein großer Vorteil gegenüber anderen Reaktivierungsverfahren ist das mehrmalige Erzeugen eines homogenen Porensystems. Dieses Verfahrens schafft die Basis für eine konstante Produktqualität, auch nach mehrmaliger Reaktivierung.

#### Für einen kleineren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Abwasserreinigung

Mit einem Tagesdurchsatz von über 30 Produktionstonnen können bei dem Anbieter große Mengen Aktivkohle in kurzer Zeit reaktiviert und für den weiteren Einsatz aufbereitet werden. Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit findet die mehrfache Verwendung von Aktivkohle und die Rückführung in die Kreislaufwirtschaft stetig größerer Beachtung. CarboTech redu-



Die Einsatzform der reaktivierten Aktivkohle bietet unter Berücksichtigung einer erwiesenen Effizienz erhebliche Vorteile für die umweltfreundliche Abwasserreinigung.

ziert damit nachhaltig den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Abwasserreinigung, insbesondere im Vergleich zum Einsatz einer frischen GAK.



**Der Autor**  
**Jörg Haermeyer,**  
Head of Sales DACH,  
Head of Business Development  
Carbotech

Wiley Online Library



CarboTech AC GmbH, Essen  
Tel.: +49 201 24 89 - 900  
info@carbotech.de · www.carbotech.de

Bilder © CarboTech

## System zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf Seeschiffen

CSSC Power (Group) Co. (CPGC) und BASF arbeiten künftig zusammen, um die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungssystemen für kommerzielle Schiffsanwendungen gemeinsam voranzutreiben. CPGC, mit Fokus auf Forschung, Entwicklung, Herstellung und Dienstleistungen in den Bereichen Schiffsmotoren, Antriebssysteme und Energieanlagen für die Seeschifffahrt, arbeitet seit langem an CO<sub>2</sub>-reduzierten Lösungen für diese Branche. Durch die Kombination mit der Expertise der BASF in der Gasaufbereitung soll die Kooperation zu einer nachhaltigen Entwicklung in der globalen Schifffahrtsindustrie beitragen. Beide Unternehmen unterzeichneten während der „Shanghai International Carbon Neutrality Expo 2023“ eine entsprechende Absichtserklärung. Die Zusammenarbeit zielt auf die Verbesserung von Energieeffizienz und Emissionsreduzierung in der Seeschifffahrt und kommt der wachsenden Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Vermeidung in dieser Branche entgegen. Die Unternehmen werden

Tests mit verschiedenen Arten von Schiffs-Kraftstoffen und -motoren durchführen, um die Entwicklung von Systemen zur Kohlenstoffabscheidung an Bord unter Verwendung der Gasbehandlungstechnologie OASE blue zu beschleunigen. Die Gasbehandlungstechnologie der BASF zeichnet sich durch niedrigen Energieverbrauch, geringe Lösemittelverluste und hohe Flexibilität aus. Die Technologie eignet sich speziell für die besonderen Herausforderungen bei Verunreinigungen in Rauchgasen aus fossilen Kraftwerken, Dampfreformern, Müllverbrennungsanlagen sowie in der Zementindustrie. „Vor dem Hintergrund des Ziels, den Spitzenwert der Kohlenstoffemissionen zu erreichen und kohlenstoffneutral zu werden, sowie im Hinblick auf den Trend zu einer grünen und kohlenstoffarmen Transformation in der Schifffahrtsindustrie konzentriert sich CPGC auf die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-armen und -freien Schiffsantrieben sowie von energiesparendem und umweltfreundlichem

Equipment. Die Zusammenarbeit mit BASF wird CPGC dabei unterstützen, die Planungen im Hinblick auf eine kohlenstoffarme und umweltfreundliche Schifffahrtsindustrie differenziert voranzutreiben und sich so vom Wettbewerb abzuheben.“, sagte Shao Yu, General Manager von CPGC. Vasilios Galanos, Senior Vice President, Intermediates Asia Pacific, BASF, sagte: „Das Interesse an Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung hat sich weltweit rasant entwickelt. Wir sind stolz darauf, mit OASE ein hervorragendes Portfolio an Lösungen für die Gasbehandlung anbieten zu können, um der wachsenden Nachfrage gerecht zu werden. Durch unsere Zusammenarbeit mit CPGC sind wir auf dem Weg zu einer nachhaltigen maritimen Industrie, indem wir unsere umfangreiche Erfahrung in der Gasbehandlung, unsere Innovationskraft und unser Engagement für Nachhaltigkeit einbringen.“

www.cpgc.net.cn · www.oase.basf.com





© mast3r - stock.adobe.com

# Der Aufstieg von Kohlendioxid als erneuerbare Kohlenstoffquelle

## Technologien, Trends und Marktchancen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung

- **Carbon Capture and Utilisation (CCU)**
- **Rohstoff CO<sub>2</sub>**
- **Verfahren, Märkte, Produkte**

Mehr als 1,3 Mio. t Kapazität für Produkte auf CO<sub>2</sub>-Basis sind bereits vorhanden und sie wird sich bis 2030 voraussichtlich mindestens vervierfachen. Ein neuer Bericht über die Nutzung von CO<sub>2</sub> für Chemikalien, synthetische Kraftstoffe, Polymere, Proteine und Mineralien des Nova-Instituts gibt einen tiefen und umfassenden Einblick in die Technologien, Trends und den dynamisch wachsenden Markt der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Weltklimarat) erkennt in seinem 2022 veröffentlichten sechsten Sachstandsbericht (IPCC 2022) erstmals die Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff (Carbon Capture and Utilisation – CCU) als eine der Lösungen zur Eindämmung des Klimawandels an. Mehrere Zukunftsszenarien für eine Netto-Null-Chemieindustrie im Jahr 2050 zeigen, dass zwischen 10 und 30 % der Nachfrage nach in Produkten gebundenem Kohlenstoff aus der Nutzung von CO<sub>2</sub> stammen wird (Kähler et al. 2023).

Das Potenzial von CCU wurde auch von mehreren globalen Marken erkannt, die bereits ihr Rohstoffportfolio erweitern. Die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette ist der Schlüssel, um die Kosten und den Nutzen angemessen auszugleichen. In Europa werden die Investitionen und Aussichten für die CO<sub>2</sub>-Nutzung durch mangelnde politische

Unterstützung weitgehend untergraben. Im Gegensatz dazu finden wir in den USA mit dem Inflation Reduction Act und in China unterstützende Regelungen. In den USA wird die Nutzung von CO<sub>2</sub> für Kraftstoffe und Chemikalien durch Abscheidung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> (Direct Air Capture, DAC) und auch aus Punktquellen gefördert, einschließlich kommerzieller Anlagen (de la Garza 2022). Solche intelligenten Maßnahmen sind notwendig, um die Brücke zwischen heute und 2050 zu schlagen, damit Unternehmen bei der nachhaltigen Transformation der Industrie wettbewerbsfähig bleiben.

Glücklicherweise haben Wissenschaft und Industrie nicht gewartet, um CCU-Technologien intensiv zu entwickeln und umzusetzen. Es gibt mehrere erfolgreich eingesetzte Technologien, die bereits auf kommerzieller Ebene genutzt werden, und viele weitere in der Labor- und Pilotphase. Derzeit werden CO<sub>2</sub> und andere

C1-reiche Gase wie Kohlenmonoxid (CO) aus fossilen und biogenen Punktquellen abgeschieden, aber auch Projekte zur direkten Abscheidung aus der Luft nehmen zu. Von dort aus kann CO<sub>2</sub> durch chemische, biotechnologische und elektrochemische Verfahren in Chemikalien, synthetische Kraftstoffe, Polymere, Proteine oder Mineralien umgewandelt werden.

### Nutzung von CO<sub>2</sub>

Die konventionelle chemische Umwandlung von CO<sub>2</sub> wird seit Jahrzehnten auf kommerzieller Ebene für die Herstellung von Chemikalien wie Salicylsäure, Harnstoff, Ethylen und Propylencarbonat genutzt. CO<sub>2</sub> kann auch direkt verwendet werden, z.B. zur gesteigerten (tertiären) Ölgewinnung (Enhanced Oil Recovery, EOR), als Feuerlöschmittel oder als Wachstumsbeschleuniger für Pflanzen in Gewächshäusern. Neuartige chemische Verfahren konzentrieren sich auf die CO<sub>2</sub>-Umwandlung, wobei die

CO<sub>2</sub>-Hydrierung zu Methan oder Methanol derzeit am vielversprechendsten ist. Ersteres kann in das Erdgasnetz eingespeist werden und trägt zur Strategie bei, die Abhängigkeit von Erdgaslieferanten zu verringern, letzteres kann einfach und hocheffizient als Kraftstoff für den Transportsektor oder als chemischer Grundstoff verwendet werden.

Großes Interesse besteht auch an der Fischer-Tropsch-Technologie zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe und Chemikalien. Diese Technologie ist bereits hundert Jahre alt und wurde hauptsächlich zur Kohlevergasung und -verwertung eingesetzt. In Verbindung mit CO<sub>2</sub>-basiertem Synthesegas lassen sich damit nachhaltig CO<sub>2</sub>-basierte Kohlenwasserstoffe wie Kerosin, Diesel, Naphtha und Wachse herstellen. Eine starke Aktivität ist bei CO<sub>2</sub>-basiertem Kerosin zu beobachten, dem wichtigsten nachhaltigen Flugkraftstoff (SAF). Auch Polycarbonate, Polyurethane (PU) und Polyethylen (PE) auf CO<sub>2</sub>-Basis sind auf dem Markt erhältlich. Schließlich kann CO<sub>2</sub> auch zu einem Karbonat für Baumaterialien mineralisiert werden: Diese auf dem Markt befindlichen Technologien nutzen den Karbonisierungsprozess zur Herstellung von Ersatzprodukten der Zementindustrie.

Die bedeutendsten biotechnologischen Umwandlungsverfahren auf CO<sub>2</sub>-Basis produzieren Ethanol in kommerziellem Maßstab, das als Kraftstoff, in der chemischen Industrie (z.B. für Ethylenglykol) und in der Kunststoffindustrie (Polyethylen) verwendet wird, sowie Methan. Darüber hinaus können durch Gasfermentation biologisch abbaubare Polymere, so genannte Polyhydroxyalkanoate (PHA), hergestellt werden, die im Handel erhältlich sind, und es laufen mehrere Pilotanlagen für die Produktion von Chemikalien und Proteinen durch Gasfermentation. Die meisten fortschrittlichen elektrochemischen Verfahren ermöglichen die Umwandlung von CO<sub>2</sub> in CO (oder Synthesegas), Methanol, Ameisensäure oder Ethylen. Viele Pilotanlagen sind in Betrieb, und die CO- (oder Synthesegas-) Produktion über diesen Weg wird bald in einer kommerziellen Anlage in Kombination mit der Fischer-Tropsch-Technologie für die Produktion einer breiten Palette von Kohlenwasserstoffen eingesetzt werden.

### CO<sub>2</sub>-basiertes Methanol als Kraftstoff oder Polymerbaustein

Methanol auf der Basis von CO<sub>2</sub> ist derzeit eine der fortschrittlichsten und vielversprechendsten CCU-Technologien zur Herstellung von Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen. Diese Technologie kann als Speichersystem für Solar- und Windenergie oder als Ausgangsstoff für erneuerbare Chemikalien (z.B. Formaldehyd) oder Polymere (über die Methanol-to-Olefins-Technologie) verwendet werden. Metha-

## CO<sub>2</sub> als Rohstoff

**Der neue Bericht des Nova-Instituts untersucht erneuerbare Kohlenstoffquelle im Detail: Welche Produkte können aus CO<sub>2</sub> hergestellt werden, und mit welchen Verfahren? Wie weit sind die Technologien bereits entwickelt und in Pilot-, Demonstrations- und kommerziellen Anlagen umgesetzt? Welche Unternehmen arbeiten an Technologien zur Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff? Was sind die Trends der kommenden Jahre bei der CO<sub>2</sub>-Nutzung? Dieser Bericht richtet sich an die Brennstoff-, Chemie- und Materialindustrie, an Marken, Technologiescouts, Investoren und politische Entscheidungsträger.**

nol kann auch als Kraftstoffzusatz verwendet werden und ist für die Schifffahrtsindustrie als alternativer Kraftstoff für Schiffe von großem Interesse, der Schweröl ersetzen kann, ohne dass die Motoren ausgetauscht werden müssen. Methanol auf CO<sub>2</sub>-Basis wird meist auf der Grundlage der CO<sub>2</sub>-Hydrierung hergestellt, einige Unternehmen entwickeln elektrochemische Verfahren. Im Jahr 2011 nahm das Pionierunternehmen Carbon Recycling International (CRI) in Island eine Methanol-Pilotanlage mit einer Kapazität von 4.000 t/a in Betrieb. Im Jahr 2022 wurde in China eine neue Anlage in Betrieb genommen, die auf der von CRI lizenzierten Technologie basiert, und bis 2025 sollen in China und Norwegen zwei neue Anlagen in Betrieb gehen. Viele andere Technologieanbieter und Unternehmen haben angekündigt, bis 2030 kommerzielle Anlagen zu errichten, die eine Kapazität von 1 Mt/a für CO<sub>2</sub>-basiertes Methanol erreichen sollen.

### Der Run auf CO<sub>2</sub>-basierte Kohlenwasserstoffe

Viele Unternehmen arbeiten an der Nutzung von CO<sub>2</sub>-basiertem Synthesegas über Fischer-Tropsch-Technologien zur Herstellung maßgeschneiderter CO<sub>2</sub>-basierter Kohlenwasserstoffe wie Kerosin, Diesel, Naphtha und Wachsen. Dies ist eine der derzeit am weitesten entwickelten Technologien zur technischen Nutzung von CO<sub>2</sub>. Der Schwerpunkt liegt auf der Kerosinfraktion, da die Quote von nachhaltig produzierten Flugtreibstoffen (SAF) die entsprechenden Projekte extrem vorantreibt, die Märkte sichert und hohe Investitionen in den europäischen Chemie-parks erfordert. Aber alle genannten Fraktionen entstehen bei Fischer-Tropsch-Prozessen und auch andere Produkte wie Naphtha oder Wachse für die chemische Industrie werden verfügbar sein. Insbesondere die Wachse erzielen gute Marktpreise. Eine der ersten kommerziellen Anlagen auf der Basis von CO<sub>2</sub>-basierten Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen

soll im Jahr 2025 in Betrieb gehen und wird von dem norwegischen Unternehmen Nordic Electrofuel betrieben. Es plant, eine Anlage mit einer Kapazität von 10 Mt/a in Betrieb zu nehmen und schrittweise zu erweitern. Insgesamt haben wir 15 Unternehmen ermittelt, die CO<sub>2</sub>-basierte Kohlenwasserstoffe entwickeln. Dabei handelt es sich entweder um Technologieanbieter von CO<sub>2</sub>-basierter Synthesetechnologie, die die Fischer-Tropsch-Technologie für die kommerzielle Herstellung von Kraftstoffen nutzen, oder um Unternehmen, die die Technologien anderer nutzen, um aus ihren Emissionen einen Mehrwert zu schaffen, oder um Konsortialprojekte.

### Biotechnologische und elektrochemische Umwandlung

Die biotechnologische CO<sub>2</sub>-Umwandlung ist nach wie vor von großem Interesse und bietet Potenzial für die Herstellung zahlreicher chemischer Grundstoffe und Polymere. Die Hauptakteure dieser Branche verfügen über ein großes Portfolio und könnten Chemikalien wie Methan, Ethanol, Milchsäure oder Butanol anbieten. Eine der fortschrittlichsten Technologien in diesem Bereich gehört dem Unternehmen LanzaTech, das derzeit drei kommerzielle Anlagen in China und Belgien für Ethanol auf CO<sub>2</sub>-Basis betreibt, das für Kraftstoff- und Ethylensynthese verwendet wird. Eine andere gehört dem Unternehmen Electrochaea, das Methan produziert, das in das Erdgasnetz eingespeist werden kann. Electrochaea verfügt über mehrere Pilotanlagen im industriellen Maßstab in Europa und den USA und will bis 2025 mehr als 320.000 t Methan pro Jahr produzieren.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verbesserungen bei der elektrochemischen Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Chemikalien erzielt, was zu einem wachsenden Interesse der wichtigsten Akteure und zur Gründung mehrerer Start-ups in diesem Bereich führte.

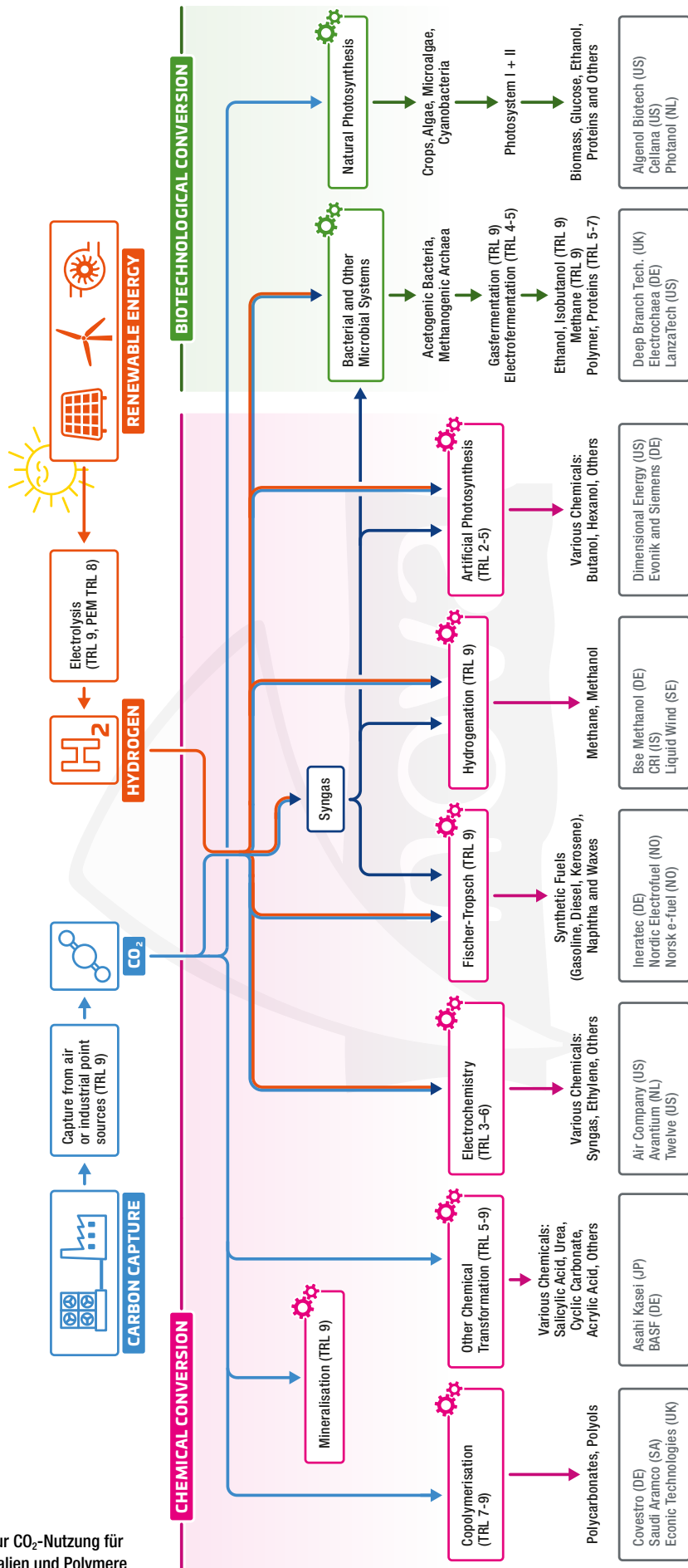
### Wichtigste CO<sub>2</sub>-Nutzung für Polymere

CO<sub>2</sub>-basierte Polycarbonate sind bereits von verschiedenen Anbietern kommerziell erhältlich. Eine der größten verfügbaren Mengen sind aromatische PC, die auf der von Asahi Kasei lizenzierten Technologie basieren. Die Gesamtproduktionskapazität von etwa 900 kt/a aromatischem PC entspricht ca. 16 % der weltweiten Produktionskapazität für aromatisches PC. Darüber hinaus bieten mehrere Unternehmen weltweit aliphatische Polycarbonate wie Polypropylencarbonat (PPC) für eine breite Palette von Anwendungen an. Versionen mit hohem Molekulargewicht werden für thermoplastische Anwendungen eingesetzt, während Versionen mit niedrigerem Molekulargewicht als Polycarbonatpolyole verwendet werden und im PU-Sektor



# Carbon Dioxide Utilisation and Renewable Energy

Wege zur CO<sub>2</sub>-Nutzung für Chemikalien und Polymere



© nova-Institute.eu | 2023

TRL information refer to the technologies using captured carbon

available at [www.renewable-carbon.eu/graphics](http://www.renewable-carbon.eu/graphics)

als Schaumstoff oder Beschichtung Anwendung finden. Der CO<sub>2</sub>-Anteil kann bei diesen Polymertypen bis zu 50 Gewichtsprozent betragen. Dies in diesem Bereich aktiven Unternehmen sind überwiegend in Asien ansässig. Darüber hinaus wird PHA auf CO<sub>2</sub>-Basis entwickelt, wobei ein Unternehmen, Newlight Technologies, die kommerzielle Kapazität erreicht hat und plant, diese bis 2024 zu erweitern. Schließlich können viele CO<sub>2</sub>-basierte Chemikalien für Polymeranwendungen genutzt werden, und einige Unternehmen haben Projekte, die auf diese Endanwendung abzielen.

## Lebens- und Futtermittel aus CO<sub>2</sub>-basierten Proteinen

Einzellige Proteine (Single Cell Proteins, SCP) sind Mikroorganismen oder isolierte Proteine, die mikrobiell synthetisiert werden. Mikroorganismen sind nicht nur in der Lage, große Mengen an Proteinen (bis zu 70 %) zu produzieren, sondern liefern auch große Mengen an Fettsäuren, Vitaminen und Mineral-salzen. Sie können als Tierfutter und für den menschlichen Verzehr verwendet werden. SCP auf CO<sub>2</sub>-Basis kann eine vielversprechende Alternative sein, um den wachsenden Proteinbedarf zu decken und gleichzeitig einen Anstieg der tierischen Futtermittel für die Proteinproduktion auf Tierbasis zu umgehen.

## Bauen mit CO<sub>2</sub>-basierten Mineralien

Die Ex-situ-Mineralisierung oder enhanced rock weathering (ERW) kann in Laborumgebungen oder Industrieanlagen eingesetzt werden. Es gibt einige Technologien auf dem Markt, die den Karbonisierungsprozess nutzen, um Ersatzprodukte aus der Zementindustrie herzustellen.

Industrieabfälle wie Hochofen- und Schlacke können als Ausgangsmaterial verwendet werden. Diese Technologien ermöglichen die Herstellung von Zement mit einem geringeren Kohlenstoff-Fußabdruck als alternatives Bau- und Konstruktionsmaterial.

## Wachstumsmarkt für CO<sub>2</sub>-basierte Produkte

Die derzeitige Gesamtproduktionskapazität neuartiger CO<sub>2</sub>-basierter Produkte wird für das Jahr 2022 auf ca. 1,3 Mt/a geschätzt. Die Produktionskapazität im Jahr 2022 wird von der Herstellung von CO<sub>2</sub>-basierten aromatischen Polycarbonaten, Ethanol aus abgeschiedenem CO/CO<sub>2</sub>, aliphatischem Polycarbonat und Methanol dominiert. Die Kapazitätsprognose bis 2030 für CO<sub>2</sub>-basierte Produkte wird wahrscheinlich mehr als 6 Mt/a CO<sub>2</sub>-basierte Produkte betragen. Eine hohe Wachstumsdynamik ist bei Methanolprojekten, Methananlagen, Ethanol und Kohlenwasserstoffen zu beobachten – letztere insbesondere für den Luftfahrtsektor.

Produkte auf CCU-Basis haben geringere Treibhausgasemissionen als vergleichbare Produkte auf fossiler Basis – wenn die gesamte zur Abscheidung und Umwandlung von CO<sub>2</sub> verwendete Energie aus erneuerbaren Quellen und grünem Wasserstoff stammt. Bereits heute können viele Technologien im Vergleich zu fossilen Technologien eine hohe Treibhausgasemissionsreduzierung von bis zu 90 % erreichen.

## Literatur

De la Garza, A. 2023: The Inflation Reduction Act Includes a Bonanza for the Carbon Capture Industry (www.time.com). Last access 23-03-01. <https://time.com/6205570/inflation-reduction-act-carbon-capture/>

IPCC 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Last access 2022-12. [www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf)

Kähler, F., Porc, O., Carus, M. 2023: RCI Report: Carbon Flows. Compilation of supply and demand of fossil and renewable carbon on a global and European level. Renewable Carbon Initiative, February 2023 (Ed.), Download at [www.renewable-carbon-initiative.com](http://www.renewable-carbon-initiative.com)

Ruiz, P., Skoczinski, P., Raschka, A., Hark, N. and Carus, M. 2023: Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) as Feedstock for Chemicals, Advanced Fuels, Polymers, Proteins and Minerals. nova-Institut GmbH (Ed.), Hürth, Germany, 2023-04

## Die Autoren



**Pauline Ruiz,**  
Expertin Nachhaltigkeit,  
Technologie und Märkte,  
Nova-Institut



**Achim Raschka,**  
Leiter der Abteilung  
Technologie und Märkte,  
Nova-Institut

Wiley Online Library



**nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH, Hürth**

Tel.: +49 2233 460 14 - 00  
contact@nova-institut.de  
[www.nova-institute.eu](http://www.nova-institute.eu)

**Dienstleistungen und Studien:**  
[www.renewable-carbon.eu](http://www.renewable-carbon.eu)

## Massendurchfluss-Transmitter für Gase, Dampf und Wasser

Mit dem neuen multivariablen Messumformer SYS-MMF bringt Systec Controls einen ganz ohne Expertenwissen zu bedienenden, kostengünstigen Massendurchfluss-Transmitter nach dem Differenzdruckverfahren auf den Markt. Der Messumformer misst neben dem Differenzdruck auch den Absolutdruck; er hat einen PT100-3-Leiter-Eingang zur Kompensation der Fluidtemperatur. Aus den Messdaten errechnet er den Massendurchfluss von Gasen, Satt- und überhitztem Dampf sowie Wasser. Standardmäßig ist das Gerät als HART-fähiger 2-Leiter-4 – 20 mA-Messumformer ausgelegt. Eine zusätzliche Modbus-Schnittstelle ist optional verfügbar. Der Typ SYS-MTF, der nur einen Differenzdrucksensor und einen Temperatureingang, aber keinen Absolutdrucksensor besitzt, ist noch kostengünstiger. Er eignet sich z.B. für Sattdampf oder wenn der Druck in der Rohrleitung als konstant angenommen werden kann. Beide Transmitter sind nullpunktstabil für hohe Genauigkeiten auch im Teillastbereich. In Kombination mit der bewährten Del-



taflow-Staudrucksonde sind druck- und temperaturkompensierte Differenzdruckmessungen mit hoher, geprüfter Genauigkeit bei geringen

Anschaffungskosten möglich. Die Installation erfolgt über einen einzigen Stutzen, sodass die Einbaukosten niedrig sind. Der sehr geringe Druckverlust der Staudrucksonde spart gegenüber anderen Lösungen viel Energie ein. Das Bedienkonzept ist einfach. Für das Set-up ist weder eine HART- oder Bus-Verbindung noch eine unverständliche und teure Software erforderlich. Der Transmitter lässt sich mit wenigen zusätzlichen Parametern direkt am Gerät einstellen oder alternativ über HART parametrieren. Transmitter plus Staudrucksonde ersetzen einen Messumformer für Druck und Temperatur. So entfallen zusätzliche Kondensatgefäße für die Dampfmassenmessung, Absperrarmaturen, eine separate Verdrahtung für Druck- und Temperaturmessung sowie der Kompensationsrechner oder entsprechende Berechnungsmodule im PLS. Die komplette Massenmessung erfolgt über einen Stutzen in der Rohrleitung.

[www.systec-controls.de](http://www.systec-controls.de)





### Keywords

- Kohlendioxid
- Direct Air Capture (DAC)
- Abscheidung, Verfahren
- Messtechnik

# Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen

## Messtechnik für die Direct Air Capture-Technologien

Direct Air Capture (DAC) ist eine aufstrebende Technologie, die das Potenzial hat, den Klimawandel zu bekämpfen, indem sie direkt Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre entfernt. DAC-Technologien verwenden verschiedene Ansätze, um CO<sub>2</sub> aus der Luft zu extrahieren. Eine gängige Methode besteht darin, Luft durch chemische Lösungen zu leiten, die CO<sub>2</sub> absorbieren können. Das absorbierte CO<sub>2</sub> wird dann isoliert und entweder zur Speicherung oder zur Nutzung in verschiedenen Industrieprozessen verwendet. Messtechnik von Endress+Hauser sorgt für die Effizienz und Sicherheit der Prozesse – und unterstützt dabei, die Verfahren zur Erreichung ihrer Wirtschaftlichkeit möglichst zügig weiterzuentwickeln.

Um Klimaneutralität bis 2050 zu erlangen und den globalen Temperaturanstieg durch den Treibhauseffekt seit Beginn der Industrialisierung auf 1,5 Grad zu begrenzen, sind grundlegende Maßnahmen in allen Sektoren notwendig. Das Hauptaugenmerk der von fossilem Kohlenstoff abhängigen Industrien liegt dabei auf der Dekarbonisierung durch das Vermeiden oder Reduzieren von Emissionen und dem Einsatz von erneuerbaren Energien, grünem Wasserstoff, Steigerungen der Effizienz und der Stärkung der Kreislaufwirtschaft. Allerdings wird das nicht genügen: Laut Weltklimarat lässt sich die Erderwärmung nur entsprechend begrenzen, wenn es zu negativen Emissionen kommt, also der Atmosphäre dauerhaft CO<sub>2</sub> entzogen wird. „Ohne das Abscheiden und anschließende Speichern oder Nutzen des Gases sind die Klimaziele nicht erreichbar“,

betont Oliver Seifert, Mitglied des strategischen Industriernetzwerks Energie und Kraftwerke bei Endress+Hauser.

### Von der Theorie in die großtechnische Anlage

Kohlendioxid ist auf diversen Wegen aus der Atmosphäre entfernbar. Zu den naturbasierten Lösungen gehören Aufforstung, Kohlenstoffbindung durch spezielle Landwirtschaft im Boden oder die Pyrolyse von Biomasse zu Biokohle, die dann als Bodenverbesserer wiederum in die Erde eingebracht wird. Da hier der Landverbrauch groß ist, entwickeln etliche Unternehmen aktuell neue technische Lösungen zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft – so genannte Direct Air Capture-Verfahren (DAC). Das auf diese Weise gewonnene hochreine CO<sub>2</sub> wird dann in geo-

logischen Formationen eingelagert (Carbon Direct Removal) oder direkt als klimaneutraler Rohstoff zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe (SAF), von Chemikalien oder als Kohlensäure in der Getränkeindustrie genutzt (CCU – Carbon Capture and Utilization). 2022 waren laut der Internationalen Energieagentur (IEA) weltweit 18 kleinere DAC-Anlagen in Betrieb. Gerade befindet sich der DAC-Markt jedoch an der Schwelle zum großtechnischen Bereich: 2024 soll die erste Anlage mit einer Abscheidungskapazität von bis zu 1 Mio. t CO<sub>2</sub> jährlich in den USA starten.

In der Regel bestehen die bislang eingesetzten Verfahren zur direkten Luft-Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus zwei Hauptschritten:

- Zuerst wird die Umgebungsluft mittels Ventilatoren in Kollektoren gesaugt, in denen das CO<sub>2</sub> von den übrigen Luft-Kompo-

nenten separiert und chemisch an ein Trägermaterial gebunden wird (Capture). Bei Solid-Air-Capture-Verfahren (S-DAC) sind das feste Amine auf Filtern, flüssigkeitsbasierte Liquid-Air-Capture-Technologien (L-DAC) nutzen dazu Amin- oder Hydroxidlösungen (Alkalilaugen). Die restliche Luft wird wieder in die Umgebung entlassen.

- Danach wird das CO<sub>2</sub> im so genannten Regenerationsschritt durch erhebliche Energiezufuhr in Form von Wärme vom jeweiligen Sorptionsmittel getrennt, so dass dieses für einen neuen Zyklus bereitsteht und das abgeschiedene Gas nachfolgend gelagert oder weiterverwendet werden kann.

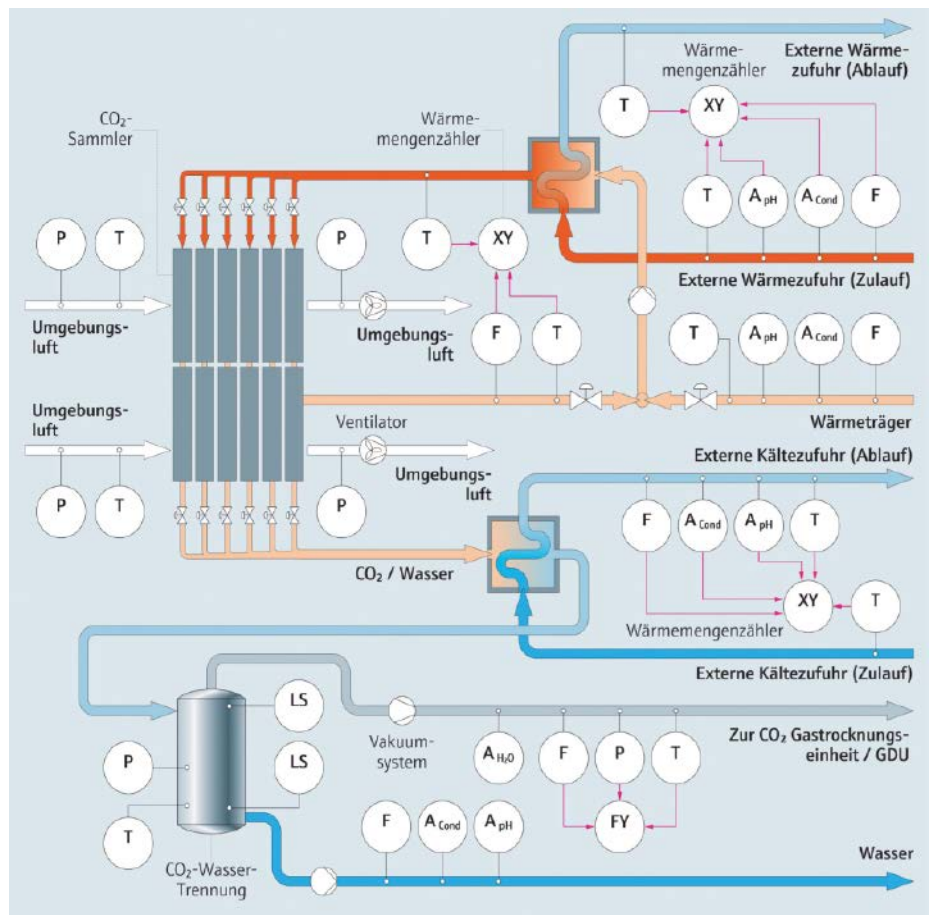
Endress+Hauser hat die Entwicklung dieser Verfahren von Anfang an begleitet: „Wir verfügen heute über ein breites Know-how in diesem Anwendungsbereich mit Tausenden von installierten Sensoren“, sagt Seifert. „Genaue Messungen sind nötig, um die auf chemischen Verfahren basierenden Prozesse sicher und effizient zu machen und ihren besonderen Herausforderungen zu begegnen.“

### Die Bedeutung des Drucks: Verfügbarkeit erhöhen

Beispiel Solid-Air-Capture (S-DAC): Hier bindet sich das Kohlendioxid an festen Aminen auf Filtern im Inneren der Kollektoren. Sind diese nach rund zwei bis drei Stunden gesättigt, werden die Kollektoren von der Umgebungsluft getrennt und der Regenerationszyklus beginnt. „Der Differenzdruck steigt durch die zunehmende Sättigung der Filter, daher ist eine Überwachung dieses Prozesswertes entscheidend“, so Seifert. Zu diesem Zweck kann eine Differenzdruckmesszelle wie die Deltabar PMD55B verwendet werden, die den Differenzdruck (DP) direkt liefert. In anderen Anwendungen wird der Druck mit einer Druckmesszelle sowohl am Eingang als auch am Ausgang aller Kollektoren gemessen. Wenn der Differenzdruck einen bestimmten Wert überschreitet, startet die Desorptionsphase.

### Die Bedeutung der Temperatur: Effizienz bestimmen

Viele Prozesse rund um Direct Air Capture beinhalten Heizen und Kühlen. „Hier ist die genaue Messung der Temperatur zur Überprüfung der Menge der weitergeleiteten Energie wichtig, um die Effizienz zu überwachen und Energiebilanzen zu erstellen“, sagt Oliver Seifert. Bei S-DAC wird eine heiße Flüssigkeit auf Wasserbasis durch die Filter geleitet, um diese auf circa 100 °C zu erhitzen. Dadurch wird das CO<sub>2</sub>-Gas freigesetzt. Dieses und die Feuchtigkeit werden abgesaugt, abgekühlt und der CO<sub>2</sub>-Wasser-Trennung zugeführt. L-DAC-Verfahren arbeiten hingegen bei der Desorption



**Feststoffbasierter Direct Air Capture (S-DAC) Prozess:** CO<sub>2</sub> wird mit Filtern unter Verwendung von festen Aminen aus der Umgebungsluft herausgefiltert. Wenn die Filter gesättigt sind, werden die Filterelemente isoliert. Durch Erhitzen auf Temperaturen von ca. 100 °C wird das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wieder abgegeben. Anschließend wird das Gas heruntergekühlt und kondensierendes Wasser wird abgeschieden. Nun wird das produzierte CO<sub>2</sub> weiter behandelt.

mit weitaus höheren Temperaturen. Hier wird das CO<sub>2</sub> im Kollektor z.B. mit Kaliumhydroxid (KOH) aus der Luft ausgewaschen. Die so entstandene Kaliumcarbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)-Lösung wird in einen Reaktor geleitet, in dem Pellets aus Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) mit ihr reagieren und festes, feuchtes Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) bilden. Im Zyklonvorwärmer wird durch Trocknung der Pellets Kalkstein (trockenes Calciumcarbonat). Dieser wird in einen Kalzinierer überführt, dort auf rund 900 °C erhitzt, wodurch Branntkalk entsteht und das eingefangene CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt wird. Danach wird der Branntkalk (CaO) mit Wasser zur Reaktion gebracht, wobei wiederum Calciumhydroxid entsteht, das zurück zum Pellets-Reaktor für den neuen Zyklus gelangt. „Für die vibrierenden Umgebungen der Kalzinier-Anlagen werden typischerweise Thermometer mit iTherm StrongSens-Technologie eingesetzt, selbst Stoß- und Schwingungsfestigkeit von > 60 g können diesen nichts anhaben“, sagt Seifert.

### Die Bedeutung der Wasserqualität: Abschaltungen vermeiden

Das bei DAC-Prozessen genutzte Kühl- und Heizungswasser muss überwacht werden, um Probleme mit Korrosion und so kostspie-

lige Abschaltungen der DAC-Anlagen zu vermeiden. Zu diesem Zweck werden Parameter wie pH-Wert, Leitfähigkeit und gelöster Sauerstoff (DO) überwacht. „Bei flüssigkeitsbasierten Ansätzen ist die Überwachung des pH-Werts auch ein wichtiger Parameter, um die Menge des aus der Atmosphäre ausgewaschenen CO<sub>2</sub> zu bestimmen“, erklärt Seifert. Memosens-2.0-Sensoren digitalisieren den Messwert im Sensor und transferieren ihn kontaktlos zum Messumformer. Das verhindert eine Verfälschung der Messwerte durch Feuchtigkeit und Korrosion, sorgt für eine erhöhte Verfügbarkeit der Messstellen und damit störungsfreie Prozesse. Neu können Memosens-Sensoren jetzt das Achtfache an Daten speichern, damit ebnet sie den Weg für vorausschauende Wartung und IIoT-Services.

### Die Bedeutung des Füllstandes: Vorräte verwalten

„Der Füllstand spielt bei der Verwaltung des erzeugten CO<sub>2</sub> eine Rolle, das in der Regel in flüssiger Form gelagert wird. Hinzu kommt die Bestandsüberwachung der in den L-DAC-Verfahren verwendeten Lösungen“, erklärt Oliver Seifert. Vibronik-Grenzschalter wie Liquiphant bieten eine zuverlässige Überfüllsicherung, für



kontinuierliche Füllstände werden sowohl Differenzdrucksensoren als auch Radarmesstechnik verwendet.

### Die Bedeutung des Durchflusses:

#### Erfassung der CO<sub>2</sub>-Menge

„Die aus der Atmosphäre gewonnene CO<sub>2</sub>-Menge ist der wichtigste Leistungsindikator von Direct Air Capture-Anlagen“, sagt Oliver Seifert. Für deren Erfassung gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten: Liegt das CO<sub>2</sub> vor der Abtrennung von Wasser als feuchtes Gas vor, werden Wirbelstrommessgeräte eingesetzt. Der Prowirl F 200 etwa verfügt über eine Druck- und Temperaturkompensation, um Massendurchfluss und Normvolumendurchfluss (z.B. in Nm<sup>3</sup>) zu erzeugen. Liegt das CO<sub>2</sub> als trockenes Gas vor, werden häufig thermische Massedurchflussmessgeräte wie t-mass 300/500 verwendet. Diese liefern direkt Massen- und Normvolumendurchflüsse. Für die Messung von flüssigem oder überkritischem CO<sub>2</sub> ist Coriolis die beste Technologie, welche den Massendurchfluss bzw. die Dichte mit guter Genauigkeit misst. „Die Dichte ist ein besonders nützlicher Parameter, da sie es ermöglicht, die Qualität

des erzeugten CO<sub>2</sub> zu bestimmen. Die Verschleppung von unerwünschten Komponenten wie Wasser kann so leicht erkannt werden“, erklärt Oliver Seifert.

Investoren und Nationen sehen Direct Air Capture als Zukunftsfeld im Kampf gegen den Klimawandel. Seit 2020 haben Regierungen fast 4 Mrd. USD an Fördermitteln für DAC bereitgestellt; eines der führenden DAC-Startups hat jüngst 500 Mio. EUR in einer Finanzierungsrunde eingesammelt. Bis zur Wirtschaftlichkeit der Technologie gibt es allerdings noch viele Herausforderungen zu lösen: Noch liegt der Preis pro abgeschiedener Tonne CO<sub>2</sub> laut Aussagen der führenden DAC-Unternehmen je nach Verfahren bei 125 bis 800 USD. „Das rührt daher, dass die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre mit 0,04 Vol.% weitaus niedriger ist als in Punktquellen wie im Strom von Rauchgasen. Dadurch ist das Abscheiden entsprechend aufwendiger und energieintensiver“, erläutert Seifert. Schätzungen zufolge benötigen DAC-Technologien 1.400 bis 2.500 kWh an erneuerbarer Energie, um 1 t CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu gewinnen. Bis 2050 wollen die Unternehmen den Ton-

nen-Preis auf 41 bis 82 USD senken. Geschehen soll das durch den großskaligen Aufbau der Verfahren, durch Energieoptimierungen und weitere Prozessverbesserungen. „Auch hier bilden hochpräzise Messungen die Basis: Sie helfen, die Prozesse besser zu verstehen und so die Wirkungsgrade der Anlagen zu erhöhen“, sagt Seifert.

#### Die Autorin

**Christine Böhringer,**

freie Journalistin, für Endress+Hauser

Wiley Online Library



Endress+Hauser (Deutschland) GmbH+Co. KG,  
Weil am Rhein

Tel.: +49 7621 975-01

info.de@endress.com · www.de.endress.com

### Taupunktsensoren vor Ort kalibrieren

Viele Taupunktsensoren müssen einmal pro Jahr neu kalibriert werden. In Verbindung mit hochgenauen Kühlspiegelhygrometern ermöglichen Taupunktkalibratoren eine Vor-Ort Kalibrierung von Sensoren und Handgeräten. So müssen die Sensoren nicht ausgetauscht und extern kalibriert werden und hohe Kosten und Stillstände in der Produktion können vermieden werden. Besonders einfach und schnell kalibriert der Taupunktgenerator ADG400 von Process Sensing Technologies (PST). Er basiert auf der volumetrischen Mischung von trockenen und feuchten Gasen und sein Leistungsbereich umfasst -80 °Cdp bis +20 °Cdp Taupunkt. Da das gesamte Gehäuse isoliert und temperaturgesteuert ist, ist die Sättigung und damit die Leistung stabil und reproduzierbar. Das Vollfarb-Touchscreen vereinfacht und beschleunigt die Einrichtung sowie die Bedie-

nung. Es zeigt nicht nur die Status- und Diagnoseinformationen an, sondern erlaubt auch die Auswahl der Betriebsmodi „Manuell“, „Profil“ oder „Fern“. Manuell lassen sich die Sollwerte per Tastendruck ändern. Werkseitig sind elf Sollwerte in 10 °C-Intervallen vorprogrammiert, wodurch Standardkalibrierungen schnell und einfach durchgeführt werden können. Im Profilmodus sind unbeaufsichtigte Kalibrierungen möglich, wenn das Gerät zusammen mit einem Referenz-Kühlspiegelhygrometer Michell S8000 RS oder S8000-100 zum Einsatz kommt. Im Fernbedienungsmodus kann es serielle Befehle über den USB-Anschluss annehmen, um Sollwerte zu ändern. Dadurch lässt sich der Taupunkt-Generator vollständig in ein Software-Kalibrierungssystem des Anwenders integrieren.

[www.processsensing.com](http://www.processsensing.com)



© Michell



# Qualitätskontrolle im chemischen Recycling

## ICP-OES und Elementaranalyse der Ausgangsstoffe und Endprodukte



### Keywords

- **Qualitätskontrolle**
- **chemisches Recycling**
- **ICP-OES**
- **Elementaranalytik**

Ohne Kunststoff wäre unser Alltag deutlich weniger komfortabel. Allerdings ist Plastikmüll zu einem der größten Probleme unserer Zeit geworden. Das chemische Recycling hat das Potenzial, die Kunststoffrecyclingquote deutlich zu steigern. Durch Techniken wie ICP-OES und die Elementaranalyse kann die Qualität von Ausgangsstoffen und Endprodukten des chemischen Recyclings schnell und einfach bewertet werden. Die wichtigsten Elemente sind hierbei Cl, S, N, Na, Si, Fe, Pb, Ca und Hg.

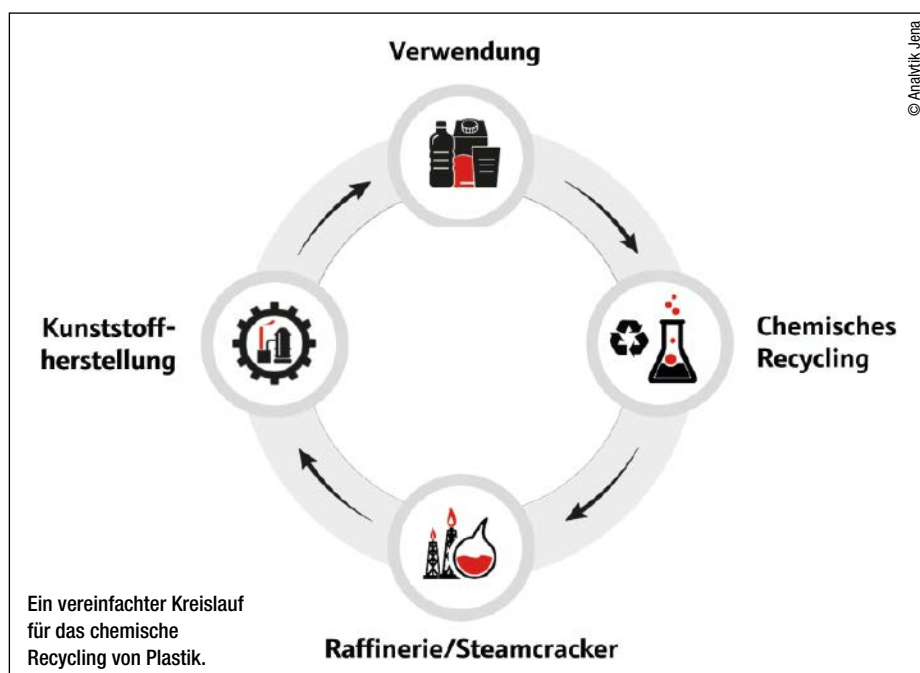
Überwiegend wird Kunststoff mechanisch recycelt. Hierbei wird minderwertiges Plastik produziert, das ein begrenztes Einsatzspektrum hat. Da sich nur gewisse Kunststoffarten – vor allem PET, das auch noch sehr sortenrein und sauber vorliegen muss – für das mechanische Recycling eignen, lässt sich durch dieses Verfahren allein die Recyclingquote nur begrenzt steigern. Durch chemisches Recycling rückt die Kreislaufwirtschaft für Kunststoff in greifbare Nähe. Bei dieser Recyclingtechnik wird der Kunststoffabfall in seine chemischen Grundbausteine zerlegt, aus denen dann neuwertige Kunststoffprodukte ohne Anwendungseinschränkungen erzeugt werden können. Als Ausgangsstoffe eignen sich besonders Polyolefinabfälle, welche 50 % aller Kunststoffabfälle bzw. 70 % aller Kunststoffverpackungen in Europa ausmachen und aktuell meist verbrannt werden. Das chemische Recycling stellt somit eine Alternative zur Müllverbrennung dar und ergänzt das mechanische Recycling, da die Techniken auf unterschiedliche Kunststoffarten als Ausgangsstoffe zurückgreifen.

### Chemisches Recycling wird bereits eingesetzt

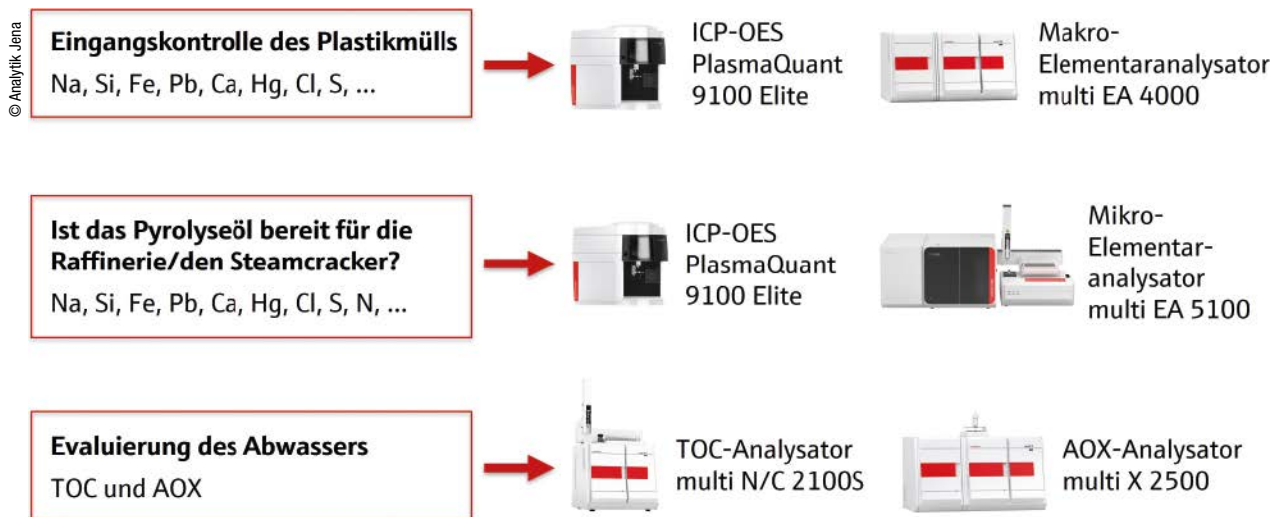
Das chemische Recycling von Kunststoffen ist längst keine Theorie mehr. Eine Partner-

schaft zwischen der Eismarke Magnum von Unilever, dem saudi-arabischen Chemiekonzern Sabic und dem auf chemisches Recycling fokussierten Start-up Plastic Energy resultierte in der ersten Lebensmittelverpackung aus recyceltem Polypropylen.<sup>[1]</sup> 2021 wurden mehr

als 30 Mio. Magnum-Becher aus chemisch recyceltem Plastik hergestellt. Bis 2025 soll die gesamte Produktion auf zirkuläres Plastik umgestellt werden. Auch die Verpackung des KitKat-Schokoriegels ist mittlerweile aus chemisch recyceltem Polypropylen – dank einer







Übersicht an Lösungen für Qualitätsprüfpunkte beim chemischen Recycling.

Zusammenarbeit von Nestle und dem Chemiekonzern LyondellBasell.<sup>[2]</sup> Vaude und Mercedes Benz geben in Zusammenarbeit mit BASF Altreifen ein neues Leben. Durch chemisches Recycling werden aus Altreifen hochwertige Outdoorbekleidungsstücke bzw. Türgriffe und Crash-Absorber für Personenzüge.<sup>[3,4]</sup> Viele globale Chemiekonzerne haben sich chemisches Recycling auf die Fahne geschrieben. Eine Vorreiterrolle nimmt die BASF ein, die sich aktiv für die legislativen Rahmenbedingungen eines Massenbilanzansatzes einsetzt.<sup>[5]</sup>

### Wie funktioniert chemisches Recycling?

In der Pyrolyse wird der Plastikabfall in einer sauerstofffreien Umgebung bei 600 °C aufgeschlossen. Die langen Polymerketten der Kunststoffe werden zerstört und es entsteht ein dickflüssiges Pyrolyseöl mit einem Spektrum an unterschiedlich langen Kohlenwasserstoffketten. Da für die Plastikherstellung chemische Grundbausteine – Monomere wie Ethen, Propen und Buten – benötigt werden, müssen die Polymerketten des Pyrolyseöls noch weiter heruntergebrochen werden. Je nachdem wie schwer oder leicht das Pyrolyseöl ist, geschieht dies in einer Raffinerie in einem Steamcracker.

### Qualitätsprüfpunkte beim chemischen Recycling

Um Korrosion, Katalysatorvergiftung und andere Probleme zu vermeiden, darf der Rohstoff, der in petrochemische Anlagen eingespeist wird, gewisse Grenzwerte für Heteroatome und Metalle nicht überschreiten. Die problematischsten Elemente bei Pyrolyseölen sind typischerweise Sauerstoff, Silizium, Halogene wie Chlor und Metalle wie Natrium, Eisen, Blei, Calcium und Quecksilber.<sup>[6]</sup> Wenn das

Pyrolyseöl die kritischen Elementkonzentrationen überschreitet, sind Aufreinigungsschritte notwendig. Alternativ kann Pyrolyseöl auch mit Rohöl gemischt werden, um die Grenzwerte zu unterschreiten. Die Qualität der Pyrolyseprodukte hängt auch von der Qualität des Abfalls ab, der verarbeitet wurde. Je verunreinigter der Müll zu Beginn ist, desto intensiver die spätere Aufreinigung. Deswegen ist auch eine Eingangskontrolle der Kunststoffabfälle essenziell. Bei der Pyrolyse fällt auch Abwasser an. Dieses muss auf den Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) und an adsorbierbaren organisch gebundenen Halogenen (AOX) untersucht werden, um die Wasserqualität einordnen zu können.

### So hilft die Laboranalytik

#### Fokus 1: Metallanalyse von Pyrolyseöl mittels ICP-OES

ICP-OES oder „Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy“ ist eine Technik, mit der eine schnelle und umfassende Metallanalyse von Pyrolyseöl über einen sehr großen Messbereich gelingt. Dabei wird die Probe in einem Plasma atomisiert und ionisiert. Bei diesem Prozess werden Photonen mit einer für das jeweilige Element charakteristischen Wellenlänge emittiert. Über eine spektrale Auswertung dieser Emissionslinien können die in der Probe enthaltenen Elemente identifiziert und quantifiziert werden. Die Analyse von Pyrolyseöl bringt einige Herausforderungen mit sich, die jedoch durch ein für die Anwendung optimiertes ICP-OES zuverlässig gemeistert werden können.

Pyrolyseöl enthält stark variierende Elementkonzentrationen. Direkt nach der Pyrolyse kann

der Anteil an Verunreinigungen sehr hoch sein, der Steamcracker benötigt jedoch ein sehr sauberes Produkt. Dank des größten Messbereichs am Markt – von ppt bis Prozent – liefert das PlasmaQuant 9100 Elite eine schnelle und eindeutige Entscheidungsbasis für Pyrolyseöl sowohl vor als auch nach potenziellen Aufreinigungsschritten. Dank einer hochauflösenden Optik, die Interferenzen effektiv vom Signal trennt, können selbst niedrigste Elementgehalte wie etwa 0,3 ppb Eisen zuverlässig erfasst werden. Durch eine zuschaltbare Lichtabschwächung werden hohe Elementgehalte ebenfalls verlässlich detektiert.

Bei organischen Proben wie Pyrolyseöl müssen außergewöhnlich viele chemische Bindungen gebrochen werden, um die Probe zu ionisieren. Dies kann die Plasmastabilität schwächen und zu starken Intensitätsschwankungen führen. Um die Langzeitstabilität des Signals zu gewährleisten, kommt der Leistungsfähigkeit des Generators eine zentrale Rolle zu. Mit einer unerreichten Generatorleistung von 1.700 W können selbst unverdünnte Proben mit hohem Gehalt an organischen Verbindungen von dem Gerät problemlos gemessen werden. Ein optimiertes Design der Plasmafackel stellt darüber hinaus sicher, dass sich keine Kohlenstoffablagerungen am Injektor bilden und somit Wartungsarbeiten minimiert werden.

Die Analyse von Pyrolyseöl kann schnell teuer werden – gerade auch weil viele ICP-OES nicht über Nacht abgeschaltet werden sollten, während dieser Zeit aber Argon und Strom weiter verbraucht werden. Der Analysator lässt sich bedenkenlos über Nacht abschalten und ist nach nur 15 Minuten Aufwärmphase wieder voll einsatzbereit. Allein dies resultiert in

Kosteneinsparungen von ca. 20 %. Auch die unverdünnte Injektion von Pyrolyseöl spart Geld und Aufwand, da die Verwendung von weniger Lösungsmittel zu weniger Abfall und Kosten führt.

### Fokus 2: Cl/S/N/C – Analyse von Pyrolyseöl mittels Elementaranalysator

Die Elementaranalyse ist eine etablierte Technik zur quantitativen Analyse von Nichtmetallen – hauptsächlich Schwefel, Stickstoff, Kohlenstoff und Halogeniden in organischen Probenmatrices wie bspw. Pyrolyseöl. Für die Bestimmung dieser Elemente wird die Probe in einer katalysatorfreien Hochtemperaturverbrennung im Sauerstoffstrom umgesetzt. Dabei wird aus den enthaltenen organischen Verbindungen neben Halogenwasserstoffen auch  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  und Wasser gebildet. Das Wasser wird in einem Trocknungsschritt entfernt. Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgt anschließend mit Hilfe selektiver Detektionsprinzipien. Um kostspieligen Problemen wie Korrosion und Katalysatorvergiftung vorzubeugen, müssen Analysewerte für Chlor und andere Heteroatome schnell verfügbar und absolut zuverlässig sein. Der Elementaranalysator multi EA 5100 ist hierfür geeignet. Für die Analyse von Pyrolyseöl bietet er Vorteile in drei entscheidenden Bereichen.

Pyrolyseöl ist hochviskos. Eine Verdünnung ist ein unerlässlicher Mehraufwand bei klassischen Analysegeräten, wird jedoch durch das beheizte Probengabesystem des Gerätes obsolet. Das Öl wird einfach und schnell direkt injiziert, der Verdünnungsschritt entfällt. Das minimiert Kosten, Abfall und Arbeitsaufwand für den Anwender.

Das Pyrolyseöl verbrennt unter normalen Bedingungen unkontrolliert und unvollständig.

Die Folge sind inkorrekte Analysenergebnisse und ein merklich erhöhter Wartungsaufwand. Das System überwacht die Verbrennung der Probe mittels eines Flammensensors und optimiert den Prozess automatisch. Das Resultat ist eine völlig rußfreie, gefahrlose und komplette Verbrennung in kürzester Zeit. Anderen Systemen fehlt ein solcher Flammensensor und der Anwender muss das Verbrennungsprogramm selbst programmieren, was mühsame sowie langwierige Methodenentwicklung bedeutet – und zwar für jeden Probenotyp und für jede Probenmenge auf ein Neues.

Pyrolyseöl hat stark variierende Cl-Gehalte. Der Analysator kann sogar 10 ng Chlor zuverlässig nachweisen mittels einer speziellen Sensorelektrode. Gleichzeitig ist auch die Quantifizierung von 1 mg Chlor ohne vorherige Verdünnung der Probe problemlos möglich. Korrekte Messergebnisse über einen solchen großen Konzentrationsbereich erfordern eine Heizung des Messgaszweigs bis zur Trocknung. Ansonsten kondensiert Wasser und hält den Chloranalyten fest, was zu Minderbefunden führt – besonders im Spurenbereich. Um kleine Gehalte quantifizieren zu können, ist auch die Stabilität des Messsignals entscheidend. Aus diesem Grund ist die elektrochemische Zelle des multi EA 5100 gekühlt, damit keine Elektrolytlösung evaporiert, und lichtgeschützt, um unerwünschte photochemische Reaktionen zu verhindern.

Da konzentrierte Schwefelsäure für die Messgastrocknung eingesetzt wird, ist Betriebssicherheit insbesondere bei Chloranalytik ein (lebens-)wichtiges Thema. Das Analysegerät verhindert den Rückfluss von Schwefelsäure zuverlässig und schützt damit sowohl den Anwender als auch das teure Analysegerät. Dieser Schutz beruht einerseits auf dem

Flammensensor, der eine schlagartige Verbrennung und den damit verbundenen Druckstoß überhaupt nicht entstehen lässt und andererseits auf einem besonderen Filter, der z.B. Druckentlastungen wegen Schwankungen in der Stromversorgung abfängt.

### Referenzen

- <sup>[1]</sup> <https://www.magnumicecream.com/uk/stories/sustainability/recycled-tubs.html>
- <sup>[2]</sup> <https://www.kitkat.co.uk/recycle-packaging>
- <sup>[3]</sup> <https://experience.vaude.com/nachhaltige-outdoor-ausrustung-aus-recycelten-altreifen/>
- <sup>[4]</sup> <https://media.mercedes-benz.com/article/3de48ee0-8a4d-4e26-b9b5-eb55cf1f8b5b?q=altreifen>
- <sup>[5]</sup> <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach.html>
- <sup>[6]</sup> Kusenberg, M., Zayoud, A., Roosen, M., Thi, H. D., Abbas-Abadi, M. S., Eschenbacher, A., ... & Van Geem, K. M.; A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition. Fuel Processing Technology. 2022, 227/ 107090, pages 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107090>

### Die Autorin

**Dr. Simone Beatrice Moos,**  
Analytik Jena Deutschland



Wiley Online Library

Analytik Jena GmbH+Co. KG, Jena

Tel.: +49 36 41 77 - 70 · [www.analytik-jena.de](http://www.analytik-jena.de)

## Elektrolytdosierung für Lithium-Ionen-Batterien

Bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität steht die Zellqualität im Mittelpunkt, die auch bei Änderungen in den komplexen Fertigungsprozessen konstant bleiben muss. Gigafactories fertigen Zellen in immer kürzeren Taktzeiten. Der Befüllung und Benetzung als zeit- und qualitätskritischsten Prozessschritten in der Zellassemblierung ist daher besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Bei der Befüllung wird der Elektrolyt unter Vakuum in eine Batteriezelle eingefüllt. Unter Benetzen, auch Wetting genannt, versteht man das Eindringen des Elektrolyten in die poröse Struktur von Elektrode und Separator – der elektrische Kontakt über Ionenaustausch entsteht. Der Elektrolyt von Lithium-Ionen-Batteriezellen besteht aus einem Lithiumsalz, meist Lithiumhexafluorophosphat, und Ethylen-, Propylen- oder Dimethyl-Carbonat als Lösungsmittel. Da der Elektrolyt bereits bei geringer Luftfeuchtigkeit lebensgefährliche Flusssäure bilden kann, findet die Elektrolytbefüllung in – extrem kostenintensiven – Trockenräumen statt. Eine prozessstabile Dosiertechnologie mit

langen Standzeiten ist entsprechend wichtig. Bei einem Metallgehäuse ist die Dosiergeschwindigkeit limitiert, da zu hohe Dosierdrücke die Zellwicklung zerstören können. Bei Pouch-Zellen führt eine Erhöhung der Geschwindigkeit lediglich zur kurzzeitigen Ausdehnung der Hülle. Bei der Planung von Fertigungsstrecken für die Befüllung von Metallgehäusen sollten Konzepte für die parallele oder mehrfache Befüllung eingeplant werden. Aufgrund der Porosität der Elektroden und des Separators ist eine große Fläche vollständig zu benetzen, ein Vorgang, der je nach Zellgröße 10 bis durchaus 45 min und mehr dauern kann. Nicht vollständig benetzte Bereiche sind inaktiv, die Qualität leidet und es kann zu Dendritenwachstum kommen – ein Sicherheitsrisiko. ViscoTec bietet eine Dosiertechnik an, die speziell auf Elektrolyte mit einer Viskosität von ~100 bis 250 mPas bei 20 °C und einer Dichte von ~1,1 bis 1,3 g/cm<sup>3</sup> ausgelegt ist. Im Bedarfsfall werden für den Anwender individuelle technische Anpassungen vorgenommen.

[www.viscotec.de](http://www.viscotec.de)







**Keywords**

- *Recycling*
- *Pyrolyse*
- *Reifen, Kautschuk*
- *Carbon Black*

# Altreifen als Rohstoffquelle

## Gewinnung von Ruß aus Altreifen

Altreifen durchlaufen zahlreiche Recycling-Prozesse, bevor aus ihnen neue Reifen werden. Unterschieden wird zwischen werkstofflichem Recycling (Sortieren, Separieren und Granulieren), rohstofflichem Recycling (z.B. Pyrolyse-Verfahren) und der Veredelung als finaler Schritt der Pyrolyse. Als integrierter Lösungsanbieter arbeitet Zeppelin Systems in allen Bereichen des Altreifen-Recyclings mit internationalen Partnern zusammen. Das deutsche Unternehmen RCB Nanotechnologies ist auf die Veredelung von roh-recovered Carbon Black spezialisiert.

Carbon Black, im Volksmund auch Industrieroß genannt, kommt fast in jedem schwarzen Gummi- oder Kunststoffprodukt vor. Ein Großteil des hergestellten Hightech Industriewerkstoffes – rund 70 % der weltweiten Gesamtproduktion – wird für die Produktion von Reifen benötigt. Für die Herstellung einer Tonne Carbon Black verbrauchen Hersteller neben großen Wassermengen rund 1,5 t fossiler Rohstoffe. Zusätzlich entstehen beim Herstellprozess von Carbon Black bis zu 3 t CO<sub>2</sub>-Emissionen. Schätzungen zufolge lagern derzeit weltweit rund vier Milliarden Altreifen auf

Deponien, ein gebrauchter Pkw-Reifen enthält ca. 3 kg Carbon Black.

### Rückgewinnung von Carbon Black

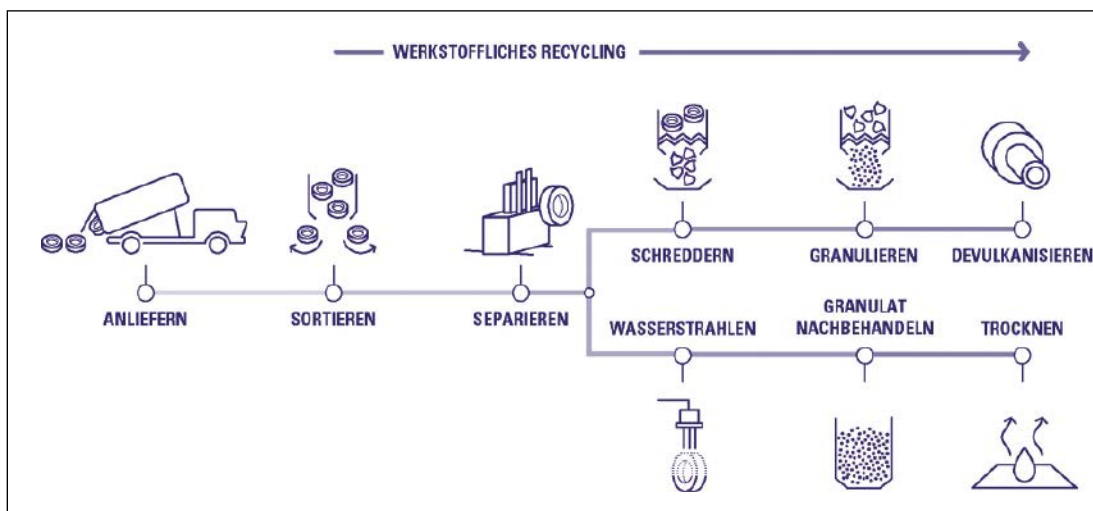
Durch innovative Technologien zur Aufbereitung der Altreifen, könnte dieser bislang ungenutzte Materialschatz zukünftig viel besser wiederverwertet werden. „In der industriellen Rückgewinnung von Carbon Black liegen vielversprechende Potenziale für Kunden und Umwelt“, sagt Dr. Markus Vöge, CEO der Zeppelin Systems. „Wir möchten unseren Kunden nachhaltige Alternativen für die Reifenherstellung

anbieten – bei gleichbleibender Qualität und in ausreichender Quantität“, ergänzt Guido Veit, Vice President Sales für Polyolefine, Rubber und Silos bei Zeppelin Systems. Und genau an diesem Punkt setzt der Friedrichshafener Anlagenbauer gemeinsam mit dem Unternehmen RCB Nanotechnologies an!

### Neues Verfahren für reines recovered Carbon Black

RCB Nanotechnologies entwickelte zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP ein neues Verfahren. Dieses Verfahren wurde

Die Prozesse zum werkstofflichen, zum rohstofflichen und chemischen Recycling von Altreifen.



von Fraunhofer IBP zum Patent angemeldet und RCB Nanotechnologies hat die exklusiven, weltweiten industriellen Verwertungsrechte. In dem Verfahren wird der Ascheanteil (aktuell von bis zu 25 %) vom – durch Pyrolyse gewonnenen – Roh-recovered Carbon Black, abgetrennt. Die Verunreinigung des Roh-recovered Carbon Black ist aktuell schon ein großes Hemmnis für die industrielle Einsetzbarkeit des Materials. Der Ascheanteil wird zudem in den kommenden Jahren stark zunehmen, da die Reifenhersteller vermehrt weitere Additive einsetzen, die sich nach der Pyrolyse neben dem Kohlenstoff als „Asche“ im recovered Carbon Black wiederfinden. Ascheanteile von 30 bis 35 % sind in absehbarer Zukunft zu erwarten, was den Einsatz des recovered Carbon

Black immer weiter erschwert bzw. unmöglich machen wird.

Damit ist das Verfahren von Fraunhofer IBP und RCB Nanotechnologies für die weitere Verwendung von recovered Carbon Black unbedingt erforderlich, um eine ökologische Alternative zu Carbon Black auch zukünftig zu gewährleisten. Das durch das Verfahren hergestellte, hochwertige und äußerst reine recovered Carbon Black (rCB) weist einen Kohlenstoffanteil von ca. 98 % auf. Zahlreiche Tests des neuen rCB mit namhaften Reifenherstellern bestätigten, dass die Qualität im Vergleich zum ursprünglichen Industriematerial (herkömmliches Carbon Black wie bspw. N550, N660 und N772) aufgrund der hohen Reinheit des veredelten rCB absolut vergleichbar ist. Somit können

bestimmte Carbon Black-Qualitäten in Zukunft zu 100 % substituiert werden. Zusätzlich werden im Prozess aus dem separierten Ascheanteil weitere, hochwertige Produkte gewonnen, bspw. Silizium- oder Zink-basierte Verbindungen. Damit entstehen im Prozess zusätzliche, nachhaltige Wertstoffkreisläufe für die Bau- und Reifenindustrie. Als Lösungsanbieter und Systemintegrator kann Zeppelin Systems die Technologie von RCB Nanotechnologies problemlos in bestehende, oder neue Pyrolyseanlagen einbinden.

**Autoren**

**Patrick Buder,**

Sustainability Strategy Manager Zeppelin Systems

**Jan Diercks,**

Managing Director, RCB Nanotechnologies



Patrick Buder, Sustainability Strategy Manager Zeppelin Systems

**Nachgefragt**



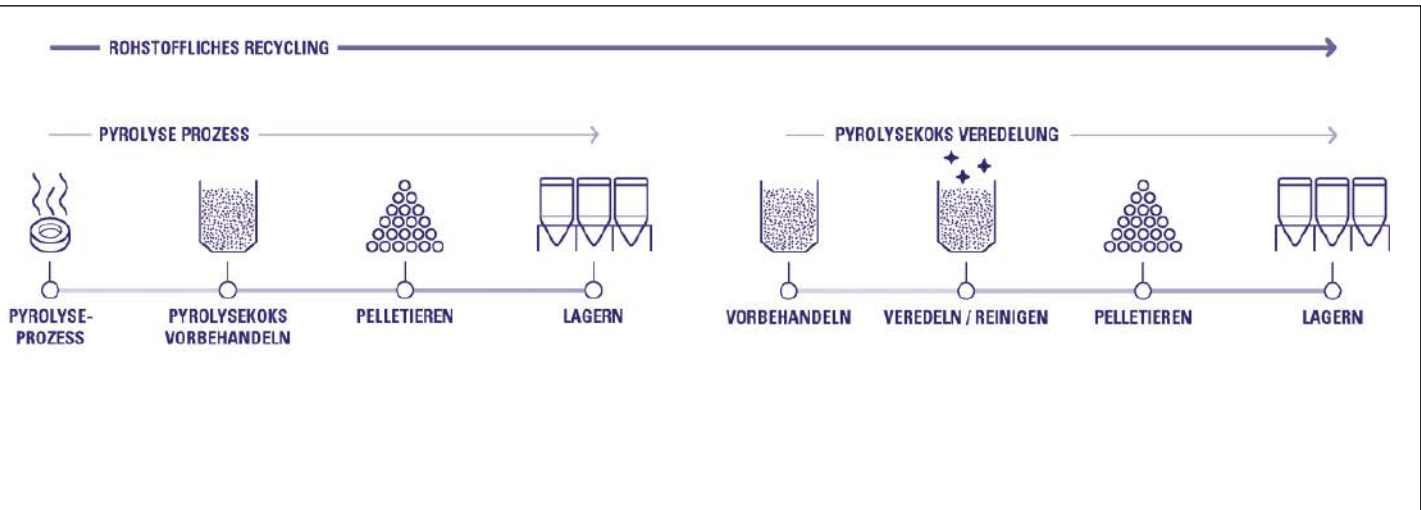
**Altreifen werden bereits in großen Mengen gesammelt. Was geschieht mit dem Altgummi in der Regel?**

**Patrick Buder:** Laut aktuellen Zahlen für das Thema Altreifen-Recycling, fallen in Europa pro Jahr rund 3,5 Mio. t Altreifen an. Allein in Deutschland kamen im Jahr 2021 rund 550.000 t benutzter Reifen zusammen. Würde jeder Altreifen in Europa wiederverwertet, könnten so rund 2,45 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

Aktuell am Markt verfügbare Verfahren der werkstofflichen Aufbereitung zerlegen den Reifen in der Regel in seine einzelnen Fraktionen – Stahl, Textil und Gummi. Der Stahl wird hierbei wiederverwertet. Die Textilfasern werden oftmals zu Ersatzbrenn-

stoff weiterverarbeitet und der Verbrennung zugeführt. Das Gummi hingegen wird je nach Korngröße entweder thermisch verwertet oder beispielsweise für Bodenbeläge und Sportplätze eingesetzt. Zunehmend werden Altreifen auch deponiert oder illegal entsorgt. Diese Art und Weise des Altreifen-Recyclings ist jedoch nicht mehr zukunftsträchtig und stellt die Recyclingbetriebe zunehmend vor wirtschaftliche Herausforderungen. Es muss ein Umdenken der Recyclingbranche stattfinden. Denn das Potenzial Altreifen ist durch die Selbstverpflichtung der Reifenindustrie, Rezyklate für die Produktion neuer Reifen einzusetzen, enorm groß.

**Warum hat das wertstoffliche Recycling von Reifen eine große Bedeutung und was ist daran besonders schwierig?**





**P. Buder:** Nach den Selbstverpflichtungen der Reifenindustrie soll ein Reifen bis spätestens 2050 zu 100 % aus natürlichen Ressourcen, aus nachhaltigen sowie recycelten Materialien hergestellt werden. Die Reifenhersteller wissen genau, dass sie auf hochwertige, recycelte und nachhaltige Materialien zurückgreifen müssen. Sie kennen ihren Bedarf und müssen daher Wege finden, um das Volumen, die Spezifikationen und die Konsistenz von den Recyclingbetrieben zu erhalten.

Hierfür benötigt es innovative Ansätze, die bestehende Verfahren aufwerten. Ziel ist, eine ausreichende Menge und eine konstante Qualität der Rezyklate sicherzustellen, die von der Reifenindustrie auch wieder bei der Produktion neuer Reifen eingesetzt werden kann. Aktuell lassen die herkömmlichen Verfahren einen Einsatz der Rezyklate in großen Mengen in einem neuen Reifen nicht zu, da die Qualitätsschwankungen zu groß sind. Hochwertige, für die Reifenindustrie verwendbare Rezyklate, können nur produziert werden, indem eine gewisse Art von Sortenreinheit geschaffen wird. Dies ist möglich, wenn bei der Reifenannahme nicht geeignete Altreifen bereits aussortiert oder Reifenteile separiert werden. Hochwertige Reifenteile wie beispielsweise die Lauffläche gebrauchter Lkw-Reifen, bedienen einen anderen Kundenstamm als Teile von den Seitenwänden.

#### Welche Produkte entstehen dabei?

**P. Buder:** In der Regel werden beim werkstofflichen Recycling rund 75 % Gummi, cirka 15 % Stahl sowie ungefähr 10 % Textilien gewonnen. Beim rohstofflichen Recycling hingegen ca. 33 % Carbon Black und ungefähr 34 % Öl. Je nach Reinheit und Qualität wird hierbei eine erhebliche Wertschöpfung erzielt.

#### Welche Verfahren kommen beim wertstofflichen und rohstofflichen Recycling zum Einsatz und welches Entwicklungspotenzial besteht hier noch?

**P. Buder:** Derzeit arbeiten wir mit Technologie- und Prozessgebern im Bereich des werkstofflichen und rohstofflichen Recyclings zusammen. Im Bereich der Reifensortierung sortiert ein Partnerunternehmen – basierend auf einer KI-Technologie – Reifen blitzschnell anhand der Markierungen auf den Seitenwänden. Auch der Verschleißgrad wird blitzschnell erkannt. Diese Technologie entscheidet bereits am Anfang der gesamten Prozesskette über den weiteren Recycling-Prozessschritt.

Mit einem weiteren Partner arbeiten wir an der Aufbereitung der Reifentextilien, welche generell eine Herausforderung für Recyclingbetriebe darstellen. Die Reifentextilien werden grundlegend verdichtet und im Straßenbau

eingesetzt. Sie dienen als Stabilisatoren zwischen Bindemittel und dem Asphalt. Im Vergleich zu bisherigen, zellulosebasierten Stabilisatoren, überzeugt das recycelte Material dabei durch eine erhöhte mechanische Festigkeit und einem erhöhten Widerstand gegen das Eindringen von Wasser im Asphalt.

Ein anderer Technologie-Partner produziert Gummigranulate sowie Gummimehl durch den Einsatz eines Hochdruck-Wasserstrahl-Prozesses. Dieses Verfahren wird insbesondere bei Großreifen, sogenannten „Off-the-Road-Reifen“ mit

Reifen-



durchmessern von bis zu vier Metern angewendet. Täglich fallen in Minen weltweit große Mengen an Altreifen an – die überall einsetzbare Hochdruck-Wasserstrahl-Technologie soll dieses Problem nachhaltig und umweltfreundlich lösen.

Um Gummi-Rezyklate wieder in eine Gummimischung integrieren bzw. erneut vulkanisieren zu können, müssen die Gummi-Rezyklate devulkanisiert werden. Und auch für diesen Fall hat die Zeppelin Sustainable Tire Alliance einen starken Partner an Bord.

Im rohstofflichen Recycling arbeiten wir mit Europas größtem und erfolgreichstem Betreiber einer Pyrolyse-Anlage für Altreifen zusammen. Bei der Pyrolyse werden Altreifen in Rohstoffe aufgespaltet, daraus resultiert Pyrolyse-Öl und recovered Carbon Black (rCB).

Ein weiterer Partner verfolgt das Ziel, gewonnenes Roh-rCB aus dem Pyrolyse-Prozess zu reinigen bzw. den Ascheanteil, welcher regionalen Schwankungen unterliegen kann, zu separieren. Neben reinem rCB entstehen zusätzlich im Prozess weitere, hochwertige Produkte, beispielsweise Silizium- und Zink-basierte Verbindungen.

Das Ergebnis: Nachhaltige Wertstoffkreisläufe für die Bau- und Reifenindustrie. Auch in der Reifenherstellung arbeiten wir mit Rohstofflieferanten zusammen, die nachhaltige

Produkte – bspw. funktionale Additive – anbieten, um den Rollwiderstand zu verringern.

Weitere Entwicklungspotenziale beim Reifenrecycling sehen wir in der gezielten Separierung der Altreifen, wie beispielsweise der Abtrennung einzelner Reifenschichten oder auch das Analysieren von Rohstoffen in Reifen. Hierdurch können die Reifen gezielt dem besten Recyclingverfahren zugeführt werden.

#### Warum braucht es eine Sustainable Tire Alliance und wie sieht diese konkret aus?

**P. Buder:** Die Zeppelin Sustainable Tire Alliance steht für Tire-to-Tire Recycling. Sie verfolgt das Ziel, die Kreislaufwirtschaft nachhaltig zu unterstützen und im Industriemaßstab anzukurbeln. Dabei kommen Technologien zum Einsatz die den Anspruch verfolgen, hochwertige Rezyklate zu produzieren und reproduzierbare Qualitäten in ausreichender Menge sicherzustellen. Der geteilte Anspruch der Zeppelin Sustainable Tire Alliance besteht darin, dass produzierte Sekundärrohstoffe ein zweites Leben in neuen Reifen erhalten.

Zeppelin Systems sieht sich als Systemintegrator und Lösungsanbieter im Bereich der Reifenherstellung und des Reifenrecyclings. Gemeinsam mit unseren Technologie-Partnern bieten wir unter dem Dach der Zeppelin Sustainable Tire Alliance skalierbare und hoch automatisierte Anlagenkonzepte entlang der Recycling-Wertschöpfungskette an. Wir sind davon überzeugt, das Reifenrecycling als Industriezweig zukünftig ganzheitlich betrachtet werden muss und nicht als stand-alone Lösung für sich „allein“ stehen kann. Im Weiteren ist die Zeppelin Sustainable Tire Alliance im engen Austausch mit den Industrien, um die Sekundärrohstoffe zu qualifizieren und die entsprechenden Absatzmärkte aufzubauen. Daran werden wir gemeinsam mit unseren Partnern nachdrücklich weiterarbeiten.

Das Interview führte Dr. Etwina Gandert, Chefredakteurin CITplus.

Wiley Online Library



Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen

evelyn.mueller@zeppelin.com  
www.zeppelin-systems.com

RCB Nanotechnologies GmbH, München

diercks@recovered-carbon-black.com  
www.recovered-carbon-black.com

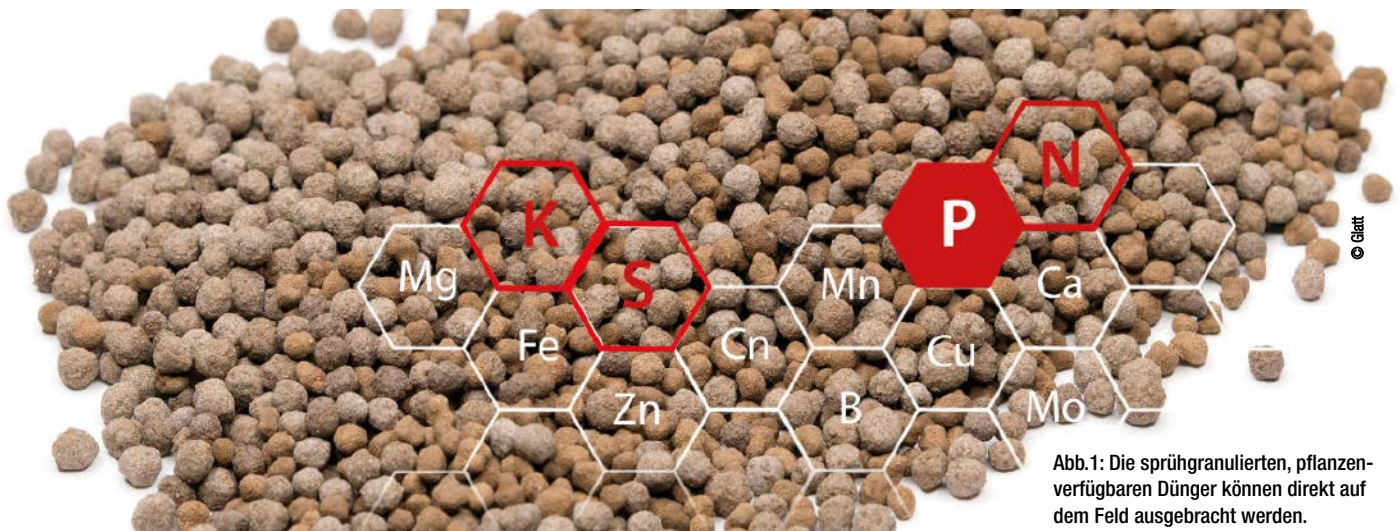


Abb.1: Die sprühgranulierten, pflanzenverfügbaren Dünger können direkt auf dem Feld ausgebracht werden.

# Klärschlamm: Schadstoff- und Rohstoffquelle zugleich

## Thermische Klärschlammverwertung als Grundlage für das Recycling der lebensnotwendigen Ressource Phosphor



### Keywords

- Klärschlamm
- Phosphorrecycling
- Wirbelschichttrocknung
- Wirbelschichtgranulation

Klärschlamm ist der Abfall der Abwasserbehandlung, in dem Schadstoffe konzentriert werden. Neben Schadstoffen filtern sie auch Phosphor aus dem Abwasser. Ein Überangebot an Phosphaten führt zur Eutrophierung von Bächen, Flüssen und Seen und letztlich zum Gewässersterben. Dass Phosphor wegen seiner gravierenden Folgen für das aquatische Ökosystem bei der Abwasserbehandlung herausgefiltert wird, macht Klärschlamm wiederum zu einer wichtigen Rohstoffquelle. Es ist diese Ambivalenz aus Schadstoff- und Rohstoffquelle, die zum Nachdenken über alternative Entsorgungswege geführt hat. Eine solche ist die Klärschlamm-Monoverbrennung.

Die thermische Klärschlammverwertung trägt dem Willen des Gesetzgebers Rechnung, künftig keine belasteten Klärschlämme mehr in der Landwirtschaft einzusetzen, und schafft die Voraussetzungen für das Recycling des begrenzten und lebensnotwendigen Rohstoffs Phosphor.

Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm ist nach wie vor eine gängige Entsorgungsmethode für Klärschlamm. Nach einer Vorbehandlung und gegebenenfalls einer Hygienisierung wird dieser auf den Feldern ausgebracht, um mit dem enthaltenen Phosphor und Stickstoff den Boden zu düngen. In die Kritik geraten ist diese Form der stofflichen Klärschlammverwertung, weil damit all jene Stoffe wieder unkontrolliert in die Umwelt gelangen, die zuvor mühsam aus dem Abwasser herausgefiltert wurden.

### Ressourcenschutz durch Phosphorrecycling

Phosphor ist nicht synthetisch herstellbar. Die Menschheit ist auf jenen Phosphor angewiesen, den die Erde ihr bietet. Es ist daher ein glücklicher Umstand, dass sich Phosphor unendlich oft recyceln lässt und damit eine Rückgewinnung des wertvollen Rohstoffs aus Sekundärquellen ermöglicht.

Wissensstand heute ist, dass die Monoverbrennung von Klärschlamm das größte Rückgewinnungspotenzial für Phosphor hat. Bei der thermischen Behandlung werden die im Klärschlamm enthaltenen organischen Schadstoffe sicher zerstört. Denn Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen (KVA) werden bei vergleichsweise hohen Temperaturen zwischen 850 und 950 °C betrieben. Der Phosphor lässt sich anschließend aus

der Klärschlammasche zurückgewinnen, bspw. mit Hilfe des nasschemischen Verfahrens PHOS-4green. Damit ist es möglich, mehr als 90 % des in der Asche enthaltenen Phosphors zurückzugewinnen. Die sehr gute Ausbeute ist einerseits auf die hohe Konzentration des Phosphors in der Asche und andererseits auf den überschaubaren Anteil an Verunreinigungen zurückzuführen. Würden alle Klärschlämme in Deutschland in Monoverbrennungsanlagen entsorgt, kämen bundesweit etwa 66.000 t Phosphor zusammen. Damit könnte der landwirtschaftliche Bedarf an mineralischen Phosphor in Deutschland zu 61 % gedeckt werden.

### Referenzmodell für eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage

Im niedersächsischen Helmstedt ist die erste der aktuell fünf geplanten Klärschlamm-Mono-



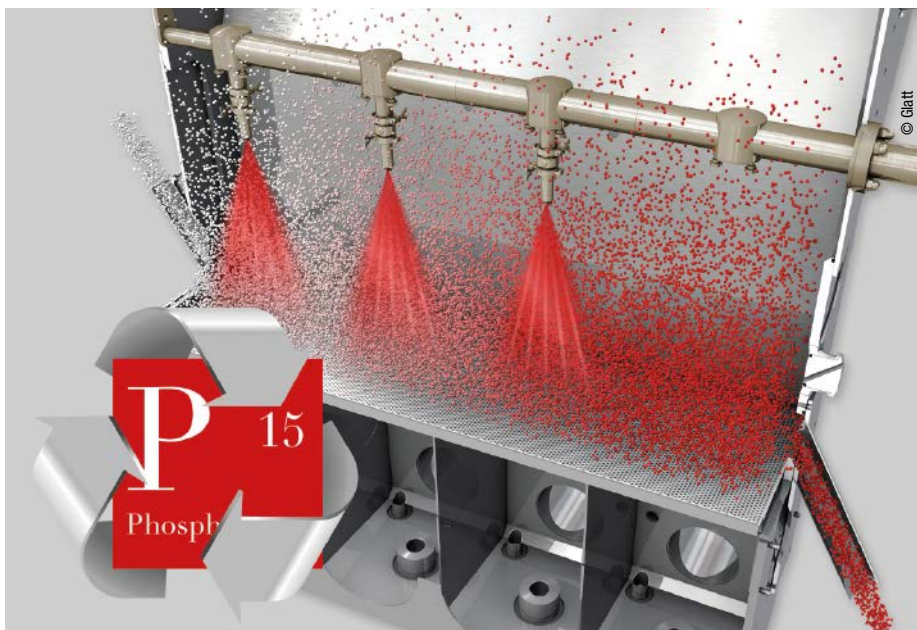


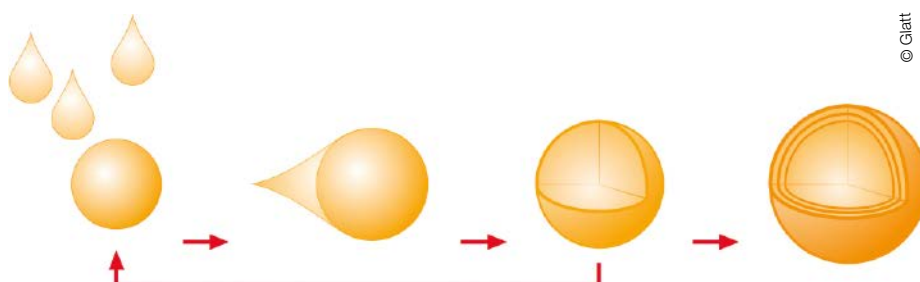
Abb. 2: Kontinuierlicher Wirbelschichtprozess: Partikelform, -aufbau und -größe sind durch die Vereinigung der Prozessschritte konvektive Trocknung und Partikelbildung nahezu frei definier- und produzierbar.

verbrennungsanlagen (KVA) im Herbst 2022 in Betrieb gesetzt worden. Sie hat die Kapazität für rund ein Fünftel der kommunalen Klärschlämme Niedersachsens. Die phosphathaltigen Aschen der KVA Helmstedt wurden von der Firma Seraplant nach dem PHOS4green-Verfahren recycelt. Die Recyclingkapazität der Anlage ist ausreichend für das Ascheaufkommen von drei KVA, aus denen jährlich bis zu 60.000 t pflanzenverfügbare Dünger für die Landwirtschaft hergestellt werden können.

Neben Helmstedt entstehen Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen in Magdeburg, Stapelfeld nordöstlich von Hamburg, im mecklenburgischen Stavenhagen sowie im niederländischen Delfzijl. Die Verbrennungstechnologie aller Anlagen ist die stationäre Wirbelschichtfeuerung. Sie ist wegen des intensiven Wärme- und Stoffaustauschs besonders geeignet für niederkalorische Brennstoffe und kann sowohl ausgefallene, entwässerte Klärschlämme im Bereich von 21 bis 27 % Trockensubstanz (TS), als auch vollgetrocknete Klärschlämme mit einem TS-Gehalt größer als 85 % thermisch behandeln. Die Anlagen sind an die regionalen Bedürfnisse angepasst. Sie basieren auf einer entwickelten Referenzanlage mit einer Kapazität von 160.000 t OS pro Jahr. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Annahme von entwässerten

Klärschlämmen. Die Verarbeitung von vollgetrockneten Klärschlämmen (> 85 % TS) spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Die Herausforderung bei der Monoverbrennung ist der vergleichsweise hohe Energieaufwand und die damit verbundenen höheren Betriebskosten. Diese Betriebskosten können jedoch dadurch gesenkt werden, dass die bei der thermischen Verwertung des Klärschlammes erzeugte Energie genutzt wird. Das Referenzmodell verfügt dafür über einen Abhitzeessel, in dem die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme in Dampf umgewandelt wird. Ebenfalls kostendämpfend wirkt sich die Integration in einen bestehenden Kraftwerksstandort aus, bspw. mit einer thermischen Abfallbehandlungsanlage. Synergieeffekte entstehen bei der Prozessüberwachung, der Logistik, der Betriebsmittelbeschaffung. Ferner besteht die Möglichkeit, den Klärschlamm mit Niederdruckdampf aus der Abfallbehandlungsanlage zu trocknen sowie das bei der Klärschlamm-trocknung anfallende Brüdenkondensat entweder in der Abfallverbrennungsanlage zu verbrennen oder es als Substitut für Ammoniakwasser in die Rauchgasreinigung zur Entstickung einzudüsen. Ein Verfahren, das am Standort Hannover bereits erfolgreich eingesetzt wird.



## Monoverbrennung und Klärschlamm-Asche

Bei der Monoverbrennung wird der Klärschlamm ohne den Zusatz anderer Brennstoffe thermisch verwertet. Nur so kann der Phosphor anschließend aus den Verbrennungsrückständen zurückgewonnen werden. Technisch hat sich dabei die stationäre Wirbelschicht als das am besten geeignete Feuerungsverfahren durchgesetzt. Das dazu entwickelte Referenzmodell für eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage wird zurzeit an fünf Standorten realisiert.

## Hochleistungsdünger aus Klärschlamm-Asche

Das patentierte Verfahren PHOS4green, ist geeignet, die Lücke im Phosphorkreislauf zu schließen, indem es das Phosphorrecycling mit dem Herstellungsprozess für neuen Dünger verbindet und zu direkt vertriebsfähigen Produkten führt (Abb. 1). Damit steht ein wirtschaftliches, ökologisches, flexibles und einfaches Verfahren zur Herstellung verschiedener, standardisierter Düngemittelgranulate aus phosphorhaltigen Sekundärrohstoffen wie Klärschlamm-Aschen zur Verfügung. Die resultierenden Qualitätsdüngemittel sind am Markt stark nachgefragte hochwertige Produkte. Diese sind in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Gartenbau zur Anpassung des Nährstoffangebots für die angebauten Kulturpflanzen über die bisherigen Anwendungstechnologien einsetzbar. Mit dem Verfahren können die Rohstoffkomponenten durch die Trennung von Phosphatumsatzungsreaktion und Granulationsprozess perfekt homogenisiert werden.

## Aufschluss der Phosphatquelle

Um die Umwandlungsreaktion einzuleiten, wird aus der phosphathaltigen Asche mit einer Säure eine Suspension hergestellt. Dieser Schritt ist notwendig, um die aschebasierten Nährstoffe pflanzenverfügbar zu machen. Je nach Anwendungsziel können Wasser und weitere feste oder flüssige Nährstoffkomponenten, auch zusätzliche Phosphatquellen, zugesetzt werden. Erst die anschließende Sprühgranulation veredelt das aufgeschlossene Phosphat zu einem marktfähigen Produkt (Abb. 2).

## Sprühgranulation in der Wirbelschicht

Die Wirbelschichttechnologie zählt zu den Leitverfahren bei partikelbildenden Prozessen und

Abb. 3: Die Sprühgranulation in der Wirbelschicht erlaubt die Trocknung von Flüssigkeiten bei gleichzeitigem, schichtweisem Aufbau von staubfreien Granulaten.

**Wie funktioniert eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage?**

Schema der Verfahrenstechnik am Beispiel der geplanten KVA Stapelfeld.

Eine Beschreibung des Verfahrens-

- 1 Anlieferhalle (geschlossen)
- 2 Abkippbunker
- 3 Stapelbunker
- 4 Bunkerabsaugung
- 5 Schubböden
- 6 Störstoffseparator
- 7 Kontakttrockner
- 8 Rohrleitung zum MHKW (Brüden)
- 9 Rohrleitung zur Brüdenbehandlungsanlage (optional)
- 10 Rohrleitung zur KVA (Brüden)
- 11 Primärluftgebläse
- 12 Wirbelschichtfeuerung
- 13 Abhitzekeessel
- 14 Dampftrömmel
- 15 Primärscheffilter
- 16 Wärmeverschiebungssystem
- 17 saurer Wäscher
- 18 alkalischer Wäscher
- 19 Saugzugaerbläse
- 20 Schalldämpfer
- 21 Schornstein
- 22 Silo Primärsche KVA
- 23 Brüdenbehandlungsanlage

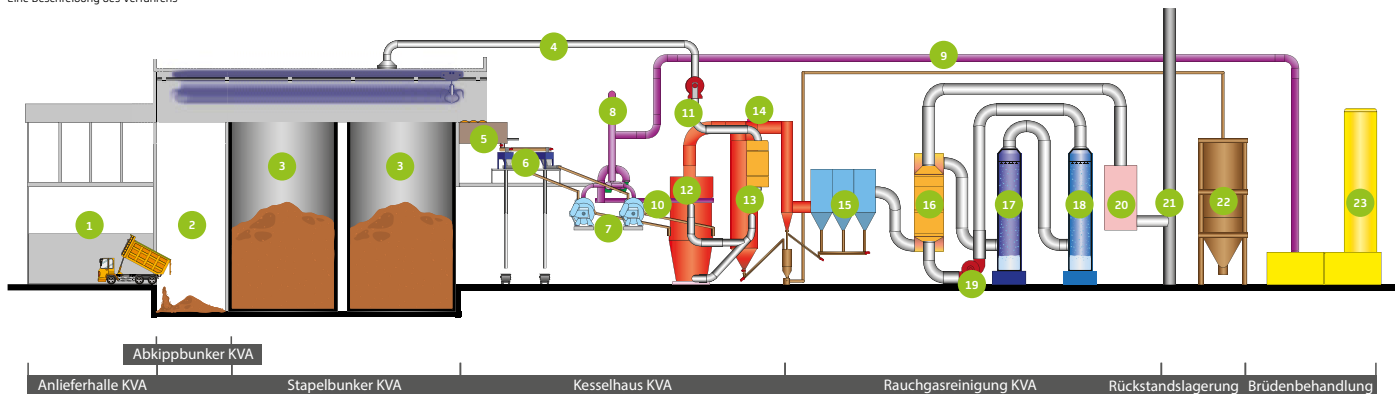


Abb.5: Skizze der Klärschlamm-Monoverbrennung bei KVA Helmstedt

© EEW

eignet sich hervorragend für die wirtschaftliche Herstellung maßgeschneiderter Dünger. Eine Wirbelschicht entsteht, wenn die nach oben gerichtete Prozessluft eine Schicht aus Feststoffpartikeln anhebt und fluidisiert. Die Prozessluft dient zur Erzeugung des Wirbelschichtzustandes und liefert gleichzeitig die für die Partikelproduktion benötigte Wärmeenergie. Neben der thermischen Behandlung von Feststoffen werden Wirbelschichtprozesse für Trocknungsaufgaben eingesetzt, um Granulate aus Pulvern (Sprühagglomeration) oder Flüssigkeiten (Sprühgranulation) zu bilden und Partikel zu beschichten (Sprüh-Coating). Alle Partikel werden in der Wirbelschicht intensiv vermischt und einer gleichmäßigen Prozessstemperatur ausgesetzt. Auf diese Weise lassen sich auch temperat

aturempfindliche Materialien schonend behandeln. Parameter wie Granulatgröße, Restfeuchte und Feststoffgehalt können gezielt beeinflusst werden, um eine Vielzahl von ganz bestimmten Produkteigenschaften zu erreichen. Bei der Sprühgranulation in der Wirbelschicht werden Flüssigkeiten in staubfreie Granulate mit kompakter, homogener Struktur und dichter Oberfläche sowie hoher Abriebfestigkeit verwandelt. Bei PHOS4green ist diese Flüssigkeit eine Phosphatsuspension. Das Gemisch aus festen und flüssigen Komponenten in dieser Suspension wird in die Prozesskammer eines Wirbelschichtapparates gesprüht. Durch den hohen Wärmeaustausch verdunsten bzw. verdampfen die wässrigen oder organischen Lösemittel sofort und die Feststoffe bilden kleine Partikel als Trägerkerne. Diese werden mit weiterer Flüssigkeit benetzt, die wiederum nach der Trocknung einen festen Mantel um den Trägerkern bilden. Dieser Vorgang wiederholt sich. Die Granulate wachsen dabei schichtweise und homogen. Es ist keine separate Zuführung von Rohstoffen erforderlich (Abb. 3). Durch den schichtweisen Aufbau entstehen so feste, kompakte und runde Vollkugeln (= Granulate) mit zwiebelähnlicher Struktur. Der Prozess der Sprühgranulation ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität, da Partikel aus verschiedenen Feststoffschichten gebildet, Kerne beladen und beschichtet werden können. Sobald die Sollgröße der Düngerkörnchen erreicht ist, wird das Produkt ausgetragen und kann direkt verpackt, vermarktet und dosiert werden.

**Mehrnährstoffdünger aus angepassten Rezepturen**

Durch Sprühgranulation in der Wirbelschicht können neben Einzelnährstoffdüngern über eine angepasste Rezeptur auch verschiedenste Mehrnährstoffdünger (z.B. NP, PK und NPS) hergestellt werden. Im Vergleich zu anderen Recyclingverfahren zur Phosphatrückgewinnung, die erhebliche Abfallmengen produzieren, ist das PHOS4green-Verfahren zu 100% abfallfrei. Die Asche wird vollständig verwertet.

**Die Autoren**



**Andreas Dous,**  
Leiter Klärschlammverwertung und Reststoffe, EEW Energy from Waste



**Jan Kirchof,**  
Head of Sales, Glatt Ingenieurtechnik



Abb. 4: Die KVA Helmstedt: Mit einer Kapazität von 160.000 t OS erzeugt sie rund 15.000 t phosphathaltige Asche. Sie wird in den vorderen beiden roten Silos für das spätere Phosphorrecycling gespeichert.

© EEW

Wiley Online Library



**EEW Energy from Waste GmbH, Helmstedt**  
Tel.: +49 5351 18-3713  
andreas.dous@eew-energyfromwaste.com  
www.eew-energyfromwaste.com/de

**Glatt Ingenieurtechnik GmbH**  
Tel.: +49 3643 47-1600  
jan.kirchof@glatt.com  
https://phos4green.glatt.com



# Pflege von biobasierten Kühlschmierstoffen

## Dynamischen Crossflow Filtration (DCF) mit keramischen Filterscheiben zur Reinigung von Schmierstoffen

Kühlschmierstoffe sind ein wichtiges Hilfsmittel bei fast allen spanenden Verfahren der Fertigungstechnik, insbesondere in der Metallbearbeitung. Ein wichtiger Aspekt bei ihrem Einsatz ist, ihre gewünschten verfahrenstechnischen Eigenschaften über lange Zeit aufrecht zu erhalten und Beeinträchtigungen durch Verunreinigungen möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund sind eine sorgfältige Überwachung und Pflege der Kühlschmierstoffe unerlässlich. Einen wichtigen Teil der Pflege stellt die Abtrennung fester Fremdstoffe dar. Eine exzellente Möglichkeit hierzu bietet die Dynamische Crossflow Filtration (DCF) mit keramischen Filterscheiben.



### Keywords

- *Crossflow Filtration*
- *Schmierstoffe*
- *Anlagenlebensdauer*

Kühlschmierstoffe haben zwei Hauptaufgaben. Diese sind einerseits das Vermindern von Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug und andererseits das Abführen der Wärme, die bei der Bearbeitung des Werkstücks entsteht. Zusätzlich transportieren Kühlschmierstoffe Späne oder Schleifstaub von der Bearbeitungsstelle weg und bieten einen Korrosionsschutz sowohl für die Maschine als auch für das Werkstück. Allerdings kommt es während ihrer Verwendung über die Zeit zu einem Eintrag von Verunreinigungen, welche die anwendungstechnischen Eigenschaften des Kühlschmierstoffs verändern. Durch Verunreinigungen entsteht ein negativer Einfluss auf

- die erzielbare Oberflächengüte des Werkstücks und damit die erreichbare Maßgenauigkeit sowie die Fertigungsqualität,
- die Standzeit der verwendeten Werkzeuge,
- die gesamte Kühlschmierstoffanlage durch erhöhten Verschleiß z.B. an Pumpen und Drehdurchführungen,
- die Lebensdauer und den Geruch des Kühlschmierstoffs durch Bildung von Mikroorganismen.

### Arten der Verunreinigung

Bei diesen Verunreinigungen kann es sich um gasförmige, flüssige Fremdstoffe wie Fremdöle oder feste wie z.B. Metallpartikel, Schleifstaub, Schmutze handeln. Die festen Fremdstoffe



Abb. 1: Ergebnis der Filtration eines wasseremulgierbaren Kühlschmierstoffes

können dabei in verschiedenen Größen vorliegen. Während sich bei der Metallbearbeitung durch z.B. Fräsen, Bohren oder Drehen große Mengen an groben Spänen im Kühlschmierstoff sammeln, wird durch andere Verfahren wie Läppen, Honen oder Schleifen feinsten Abrieb in diesen eingebracht.

Insbesondere bei wassermischbaren und wassergemischten Kühlschmierstoffen fördern Feinstpartikel zudem die Bildung von Bakterien. Neben diesen ist eine Verkeimung auch durch andere Mikroorganismen wie Hefen oder Pilze möglich. Die Verkeimung verkürzt die Lebensdauer der Kühlschmierstoffe und kann gleichzeitig auch negative gesundheitliche Auswirkungen auf die Mitarbeiter haben, welche an Maschinen mit den Kühlschmierstoffen arbeiten. So werden bspw. Hautkrankheiten und Allergien begünstigt.

### Verunreinigungen verursachen Kosten

Aus einem gesteigerten Umweltbewusstsein und strengeren gesetzlichen Vorgaben setzen sich zunehmend biobasierte oder biologisch abbaubare Kühlschmierstoffe gegenüber konventionellen durch. Bei diesen besteht ebenfalls eine erhöhte Gefahr der Verkeimung. Als Folge kann ein intensiver Fäulnisgeruch entstehen, der die Mitarbeiter am Arbeitsplatz belästigen kann. Ein säuerlicher oder schwefeliger Geruch ist dabei meist auf Bakterien und ein muffiger Geruch auf Pilze zurückzuführen. Um dem entgegenzuwirken und die Standzeit zu erhöhen, werden den Kühlschmierstoffen häufig Biozide zugegeben. Durch eine Entfernung der Mikroorganismen mittels Filtration kann die Geruchsbelästigung ebenfalls reduziert werden und der Einsatz von Bioziden verringert werden.

Schließlich muss auch der wirtschaftliche Aspekt durch die verkürzte Lebensdauer bedacht werden. Neben den Ausgaben für den neuen Kühlschmierstoff entstehen auch Kosten für die Entsorgung des verbrauchten Kühlschmierstoffs, den Austausch und den Stillstand der Maschinen während des Austauschs. Zudem erhöht sich durch die Verunreinigungen auch der Wartungsaufwand an Maschinen und der Kühlschmierstoffanlage. Es gibt also eine Vielzahl von Gründen, aus denen sich die kontinuierliche Überwachung und Pflege von Kühlschmierstoffen lohnt.

### Aufreinigung durch Abtrennung

Ein ausgezeichnetes Verfahren zur Abtrennung fester Fremdstoffe ist die Dynamische Crossflow Filtration (DFC) oder Rotationsfiltration. Hier werden poröse, keramische Filterscheiben auf einer Hohlwelle montiert. Die Welle mit den Scheiben befindet sich in einem Gehäuse, welches mit dem Rohmaterial (Feed) befüllt wird. Ein Überlauf (Retentat) erlaubt bei Bedarf das permanente Durchströmen des Behälters. Durch die zur Befüllung verwendete Pumpe entsteht ein Druckgradient zwischen Außen- und Innenseite der Scheiben. Durch diesen Transmembrandruck (TMP) dringt das Filtrat in die porösen Keramikscheiben ein und wird über Kanäle im Inneren der Scheiben zur Hohlwelle geleitet. Über die Hohlwelle wird schließlich das Filtrat aus dem System entfernt. Gleichzeitig versetzt ein Motor die Welle mit den Scheiben in Rotation und sorgt so für eine tangentielle Überströmung der Scheiben (Crossflow). Auf diese Weise entstehen Scherkräfte, welche die Oberfläche der Scheiben permanent abreinigen und das Wachstum eines Filterkuchens behindern. So wird ein dauerhaft hoher Filtratfluss gewährleistet (Abb. 2).

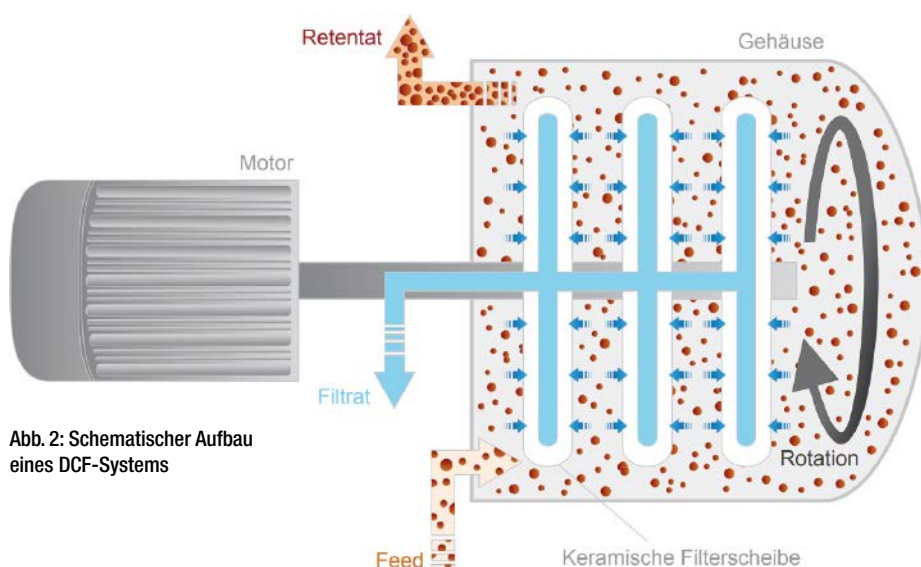


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines DCF-Systems

### Vorteile der Rotationsfiltration

Ein Vorteil der Rotationsfiltration gegenüber konventionellen Crossflow-Verfahren besteht zudem in der Entkopplung von Transmembrandruck und Überströmungsgeschwindigkeit. Während bei Letzteren die Einstellung des richtigen Druckgefälles über die Modullänge zur Änderung der Geschwindigkeit nötig ist, erfolgt bei der dynamischen Crossflow Filtration die Änderung allein über die Rotationsgeschwindigkeit der Scheiben. Je nach Durchmesser der verwendeten Scheiben und Drehzahl sind sehr hohe Überströmungsgeschwindigkeiten von bis zu 8 m/s möglich. Durch die Entkopplung dieser beiden Größen ist eine maßgeschneiderte Anpassung der beiden Parameter an das zu filtrierende Medium möglich. Ein weiterer Vorteil gegenüber konventionellen Crossflow-Verfahren besteht im deutlich geringeren Energieverbrauch. Die verwendeten keramischen Filterscheiben stehen mit Porengrößen von 2,0 µm bis 5 nm zur Verfügung und werden mit drei verschiedenen Durchmessern angeboten. Sie haben eine hohe Lebensdauer, sind robust und können durch Rückspülen mit Filtrat gereinigt werden.

### Filtration im Praxistest

Das Ergebnis der Filtration eines wasseremulgierbaren Kühlschmierstoffes wird in Abb. 1 gezeigt. Im rechten Fläschchen ist der verschmutzte Kühlschmierstoff vor der Filtration zu sehen. In der Mitte wird das Ergebnis einer Filtration mit einer Porengröße von 0,2 µm gezeigt. Diese Größe hat nicht ausgereicht, um sämtliche Verunreinigungen zu entfernen. Im linken Fläschchen ist schließlich das Filtrat zu sehen, welches nach einer Filtration

Abb. 3: Anordnung mehrerer Scheiben in einem Stack

mit einer Porengröße von 80 nm erhalten wurden. Der Kühlschmierstoff wurde vollständig von Verunreinigungen befreit und steht direkt für eine erneute Verwendung zur Verfügung.

Die Aufbereitung von Kühlschmierstoffen durch die dynamische Crossflow Filtration mit keramischen Filterscheiben von Kerafol bringt eine Vielzahl von Vorteilen mit sich. Neben dem Schutz der Gesundheit der Mitarbeiter am Arbeitsplatz und der Reduzierung der Geruchsbelastung, ergeben sich auch wirtschaftliche Vorteile durch geringeren Verbrauch an Kühlschmierstoffen und weniger Stillstand von Maschinen. Zudem wird durch die längere Lebensdauer der ökologische Fußabdruck reduziert.



**Der Autor**  
Philipp Fuhrmann,  
Sales Engineer / R&D Engineer –  
Ceramic Filters, Kerafol  
Keramische Folien

Wiley Online Library



**KERAFOL Keramische Folien GmbH & Co. KG,**  
Eschenbach i.d.OPf.  
Tel.: +49 96 45 88 - 622  
philipp-fuhrmann@kerafol.com · www.kerafol.com



# Fahrzeugkatalysatoren zerkleinern

## Pulverisierung von Katalysatorwaben zur Analyse

In Fahrzeugkatalysatoren sind Edelmetalle enthalten, die es sich zu recyceln lohnen kann. Der Edelmetallgehalt lässt sich analytisch bestimmen. Für die Probenvorbereitung ist eine Pulverisierung der Katalysatorwabenkerne notwendig, die mit Schneid- und Planetenmühlen erfolgen kann.

Durch den Katalysator in der Abgasnachbehandlung in Fahrzeugen können die Schadstoffemissionen im Abgas drastisch reduziert werden. Der Fahrzeugkatalysator besteht meistens aus mehreren Komponenten. Als Träger dient ein temperaturstabiler Wabenkörper aus Keramik, in der Regel Cordierit, der eine Vielzahl dünnwandiger Kanäle aufweist. Auf dem Träger befindet sich der sogenannte Washcoat. Er besteht aus porösem Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und dient der Vergrößerung der Oberfläche. Durch die hohe Rauheit wird eine große Oberfläche von bis zu mehreren hundert Quadratmetern pro Gramm realisiert. In dem Washcoat sind die katalytisch aktiven Substanzen eingelagert. Je nach Katalysatortyp sind diese unterschiedlich. Bei modernen Dreiwegekatalysatoren sind dies z.B. die Edelmetalle Platin, Rhodium oder Palladium bzw. eine Kombination aus diesen<sup>[1]</sup>.

### Zerkleinerung der Katalysatorwabenkörper

Im Laborversuch soll der keramische Wabenkörper zu Pulver zerkleinert werden, um dieses anschließend auf die katalytisch aktiven Edelmetalle zu untersuchen.

Im ersten Versuch wurde der Wabenkörper in der Universal-Schneidmühle Pulverisette 19 Large vorzerkleinert. Das Gerät war ausgestattet mit dem Scheibenfräser-Rotor mit Wendeschneidplatten und Gegenmessern aus Hartmetall Wolframkarbid WC, einer Siebkassette mit Quadratloch 4-mm sowie einem Hochleistungszyklon aus Edelstahl. Die Mahldauer für die Probe betrug etwa eine Minute bei einer Drehzeleinstellung von 1,500 U/min.

Im zweiten Versuch wurde ein Teil der vorzerkleinerten Probe in der Pulverisette 14 premium line weiterverarbeitet. 200 mL der Probe wurden binnen 38 s auf eine Endfeinheit  $< 500 \mu\text{m}$  zerkleinert. Die Mühle war ausgestattet mit dem Schneidrotor, sowie zusätzlich mit dem Kleinmen-



Keramikteile Katalysator mit Vliesumrandung



#### Keywords

- Mahlen, Pulverisieren
- Katalysator
- Recycling

genzyklon verbunden, der passiv betrieben wurde. Prinzipiell besteht die Möglichkeit bei Einsatz dieser Rotor-Schnellmühle, eine maximale Endfeinheit der gemahlten Probe von  $< 80 \mu\text{m}$  zu erzielen.

Im dritten Versuch wurde ein Teil der vorzerkleinerten Probe aus der Pulverisette 19 Large in der Planetenmühle Pulverisette 5 premium line weiter zerkleinert. Die Mahldauer betrug 1 min, das Gerät wurde betrieben mit Mahlbechern 125 ml Volumen sowie 20 mm Mahlkugeln aus Zirkonoxid. Die Drehzahl der Sonnenscheibe war auf 450 U/min eingestellt, die erzielte Endfeinheit betrug  $< 100 \mu\text{m}$ . Da es sich um ein geschlossenes System handelt, können keine schädlichen Stoffe während des Mahlprozesses eingeatmet werden. Darüber hinaus bietet das Gerät die Möglichkeit, Endfeinheiten von Proben bis in den Nanobereich zu erzielen.

### Von der Analyse zum Recycling

Mit den durchgeführten Versuchen konnte der Gerätehersteller Fritsch zeigen, dass es verschiedene Lösungen im Portfolio gibt um Katalysatoren zu zerkleinern. In einer weiteren Analyse kann der Anwender feststellen, wie hoch z.B. der Edelmetallanteil im zerkleinerten Gut ist, um zu entscheiden, ob Potenzial besteht, die Edelmetalle wiederzugewinnen.

#### Die Autorin

Dagmar Klein, Sales Manager, Fritsch

Quelle

[1] Wikipedia Fahrzeugkatalysator

Bilder © Fritsch



Blick in Mahlkammer P19 Large nach Zerkleinerung.

Wiley Online Library



Fritsch GmbH, Idar-Oberstein  
Tel.: +49 67 84 70 - 0  
info@fritsch.de · www.fritsch.de

## Anlagentechnik

### Armaturen



#### GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG

Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: [info@gemu.de](mailto:info@gemu.de)  
<http://www.gemu-group.com>

### Armaturen



#### NOGE TECHNIK GMBH

Pappelstr. 2  
85649 Brunnthal-Hofolding  
Tel. 08104/6498048  
Fax. 08104/648779  
E-Mail: [info@noge-technik.de](mailto:info@noge-technik.de)  
<http://www.noge-technik.de>

### Dichtungen



#### RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.

Englerstraße 18 · D-69126 Heidelberg  
Tel.: 06221/3125-0 · Fax: -10  
[info@rct-online.de](mailto:info@rct-online.de) · [www.rct-online.de](http://www.rct-online.de)  
*Schläuche & Verbinder, Halbzeuge aus  
Elastomeren & Kunststoffen*

### Pumpen



#### KSB SE & Co. KGaA

Johann-Klein-Straße 9  
D-67227 Frankenthal  
Tel.: +49 (6233) 86-0  
Fax: +49 (6233) 86-3401  
<http://www.ksb.com>



#### Lutz Pumpen GmbH

Erlenstr. 5-7 / Postfach 1462  
97877 Wertheim  
Tel./Fax: 09342/879-0 / 879-404  
[info@lutz-pumpen.de](mailto:info@lutz-pumpen.de)  
<http://www.lutz-pumpen.de>



#### RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.

Englerstraße 18 · D-69126 Heidelberg  
Tel.: 06221/3125-0 · Fax: -10  
[info@rct-online.de](mailto:info@rct-online.de) · [www.rct-online.de](http://www.rct-online.de)  
*Schläuche & Verbinder, Halbzeuge aus  
Elastomeren & Kunststoffen*

### Pumpen



#### JESSBERGER GMBH

Jaegerweg 5 · 85521 Ottobrunn  
Tel. +49 (0) 89-6 66 63 34 00  
Fax +49 (0) 89-6 66 63 34 11  
[info@jesspumpen.de](mailto:info@jesspumpen.de)  
[www.jesspumpen.de](http://www.jesspumpen.de)

### Pumpen, Zahnradpumpen



#### Beinlich Pumpen GmbH

Gewerbestraße 29  
58285 Gevelsberg  
Tel.: 0 23 32 / 55 86 0  
Fax: 0 23 32 / 55 86 31  
[www.beinlich-pumps.com](http://www.beinlich-pumps.com)  
[info@beinlich-pumps.com](mailto:info@beinlich-pumps.com)

*Hochpräzisionsdosier-, Radial-  
kolben- und Förderpumpen,  
Kundenorientierte Subsysteme*

### Regelventile



#### GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG

Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: [info@gemu.de](mailto:info@gemu.de)  
<http://www.gemu-group.com>

### Reinstgasarmaturen



#### GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG

Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: [info@gemu.de](mailto:info@gemu.de)  
<http://www.gemu-group.com>

### Rohrbogen/Rohrkupplungen



#### HS Umformtechnik GmbH

Gewerbestraße 1  
D-97947 Grünsfeld-Paimar  
Telefon (0 93 46) 92 99-0 Fax -200  
[kontakt@hs-umformtechnik.de](mailto:kontakt@hs-umformtechnik.de)  
[www.hs-umformtechnik.de](http://www.hs-umformtechnik.de)

### Strömungssimulationen



Ihr Spezialist für  
Strömungssimulationen  
in der Verfahrenstechnik.  
[www.proceng.ch](http://www.proceng.ch)

### Ventile



#### GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG

Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: [info@gemu.de](mailto:info@gemu.de)  
<http://www.gemu-group.com>

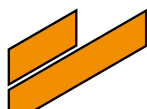
### Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung



Spökerdamm 2  
25436 Heidgraben  
Tel. +49(0)4122 922-0  
[info@helling.de](mailto:info@helling.de)  
[www.helling.de](http://www.helling.de)

### Ingenieurbüros

### Biotechnologie



#### VOGELBUSCH

#### Biocommodities

#### Vogelbusch Biocommodities GmbH

A-1051 Wien, PF 189  
Tel.: +431/54661, Fax: 5452979  
[vienna@vogelbusch.com](mailto:vienna@vogelbusch.com)  
[www.vogelbusch-biocommodities.com](http://www.vogelbusch-biocommodities.com)

*Fermentation, Destillation  
Evaporation, Separation  
Adsorption, Chromatographie*

## Lager- und Fördertechnik

### Dosieranlagen

#### ProMinent Dosiertechnik GmbH

Im Schuhmachergewann 5-11  
D-69123 Heidelberg  
Tel.: 06221/842-0, Fax: -617  
[info@prominent.de](mailto:info@prominent.de)  
[www.prominent.de](http://www.prominent.de)

## Mechanische Verfahrenstechnik

### Koaleszenzabscheider



#### Alino Industrieservice GmbH

D-41334 Nettetal  
Tel.: +49 (0) 2157 / 8 95 79 91  
[www.alino-is.de](http://www.alino-is.de) · [mail@alino-is.de](mailto:mail@alino-is.de)

### Magnetfilter & Metallsuchgeräte

#### GOUDSMIT MAGNETICS GROUP BV

Postfach 18 / Petunialaan 19  
NL 5580 AA Waalre  
Niederlande  
Tel.: +31-(0)40-2213283  
Fax: +31-(0)40-2217325  
[www.goudsmitmagnetics.com](http://www.goudsmitmagnetics.com)  
[info@goudsmitmagnetics.com](mailto:info@goudsmitmagnetics.com)

### Tröpfchenabscheider



#### Alino Industrieservice GmbH

D-41334 Nettetal  
Tel.: +49 (0) 2157 / 8 95 79 91  
[www.alino-is.de](http://www.alino-is.de) · [mail@alino-is.de](mailto:mail@alino-is.de)

### Vibrationstechnik



*pneumatische Vibratoren + Klopfer*

**ALDAK** VIBRATIONSTECHNIK  
Redcarstr. 18 • 53842 Troisdorf  
Tel. +49 (0)2241/1696-0, Fax -16  
[info@aldak.de](mailto:info@aldak.de) • [www.aldak.de](http://www.aldak.de)





**Messtechnik**

**Aerosol- und  
Partikelmesstechnik**



**Seipenbusch particle engineering**  
76456 Kuppenheim  
Tel.: 07222 9668432  
info@seipenbusch-pe.de  
www.seipenbusch-pe.de

**Durchflussmessung**



**GEMÜ Gebr. Müller  
Apparatebau GmbH & Co. KG**  
Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: info@gemu.de  
http://www.gemu-group.com

**Ventile**



**GEMÜ Gebr. Müller  
Apparatebau GmbH & Co. KG**  
Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 (0) 79 40 / 123 0  
E-Mail: info@gemu.de  
http://www.gemu-group.com

**Thermische  
Verfahrenstechnik**

**Abluftreinigungsanlagen**



**ENVIROTEC® GmbH**  
63594 Hasselroth  
06055/88 09-0  
info@envirotec.de · www.envirotec.de



**U MWELTTECHNIK**  
www.venjakob-umwelttechnik.de  
mail@venjakob-ut.de

**WK Wärmetechnische Anlagen  
Kessel- und Apparatebau  
GmbH & Co. KG**  
Industriestr. 8-10  
D-35582 Wetzlar  
Tel.: +49 (0)641/92238-0 · Fax: -88  
info@wk-gmbh.com  
www.wk-gmbh.com

**Vakuumsysteme**

**www.vacuum-guide.com**

(Ing.-Büro Pierre Strauch)  
Vakuumpumpen und Anlagen  
Alle Hersteller und Lieferanten

**Verdampfer**



**GIG Karasek GmbH**  
Neusiedlerstrasse 15-19  
A-2640 Gloggnitz-Stuppach  
phone: +43/2662/427 80  
Fax: +43/2662/428 24  
www.gigkarasek.at

**Wärmekammern**



**Will & Hahnenstein GmbH**  
D-57562 Herdorf  
Tel.: 02744/9317-0 · Fax: 9317-17  
info@will-hahnenstein.de  
www.will-hahnenstein.de

**www.chemanager.com**

[chemanager-online.com/reinraumtechnik](http://chemanager-online.com/reinraumtechnik)  
[chemanager-online.com/citplus](http://chemanager-online.com/citplus)  
[lvt-web.de](http://lvt-web.de)



# Top-Titel

für die Chemie-, Pharma-  
und Lebensmittelindustrie

**CHEManager** – Die führende Branchenzeitung für die Märkte der Chemie und Life Sciences

**LVT LEBENSMITTEL Industrie** – Die Zeitschrift für Fach- und Führungskräfte der Lebensmittel- und Getränkeindustrie

**CITplus** – Das Praxismagazin für Verfahrens- und Chemieingenieure

**ReinRaumTechnik** – Die führende Fachpublikation für Betreiber und Nutzer von Reinräumen



Alino	49	Fraunhofer-Institut UMSICHT Institutsteil Sulzbach-Rosenberg	25	KSB	49	Pumpen Center Wiesbaden	49
Alwast Consulting	12	Fritsch Milling and Sizing	48	Leuphana Universität Lüneburg	16	RCB Nanotechnologies	40
Analytik Jena	37	Gemü	49, 50	Lutz-Pumpen	49	RCT Reichelt Chemietechnik	49
BASF	29	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)	7	MCH Messe Schweiz	7	Seipenbusch particle engineering	50
Beinlich Pumpen	49	GIG Karasek	50	Meorga	5, 7, Beilage	Systec Controls Mess- und Regeltechnik	33
CarboTech	28	Glatt Ingenieurtechnik	43	Messe Bremen	7	Vega Grieshaber	8
Covestro	2, US, 21, 24	Goudsmit Magnetics Systems	49	Messe Frankfurt	7	Venjakob	50
Dechema	7	Haus der Technik (HDT)	7	Netter Vibration	49	Verein Deutscher Ingenieure (VDI)	9
EcoEnergy Gesellschaft Energie- und Umwelttechnik	12	Helling	49	Nippon Gases	24	Viscotec Pumpen- und Dosier- technik	39
EEW Energy from Waste	43	Hima Paul Hildebrandt	8	Noge	49	Vogelbusch	49
Endress+Hauser	10, 34	HS Umformtechnik	49	Nova-Institut	30	Will & Hahnenstein	50
Envirotec	50	Ing.-Büro Pierre Strauch	50	NSB gas processing	50	Witte	49
Findeva	49	International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3)	20	Palas	50	WK Wärmetechnische Anlagen-, Kessel- und Apparatebau	50
Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik (GVT)	7, 9	Jessberger	49	Proceng Moser	49	Wolfersdorff Consulting	22
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB	19	Kerafol – Keramische Folien	46	Process Sensing Technologies (PST)	36	Zepplin Systems	40
				Prof. Dr. Jaberg & Partner	7		
				Prominent Dosier- technik	49		

## Impressum

### Herausgeber

GDCh, Dechema e. V., VDI-GVC

### Verlag

Wiley-VCH GmbH  
Boschstraße 12, 69469 Weinheim  
Tel.: 06201/606-0, Fax: 06201/606-100  
citplus@wiley.com, www.gitverlag.com

### Geschäftsführer

Sabine Haag  
Dr. Guido F. Herrmann

### Director

Roy Opie

### Publishing Director

Dr. Heiko Baumgartner

### Produktmanager

Dr. Michael Reubold  
Tel.: 06201/606-745  
michael.reubold@wiley.com

### Chefredakteurin

Dr. Etwina Gandert  
Tel.: 06201/606-768  
etwina.gandert@wiley.com

### Redaktion

Dr. Volker Oestreich  
voe-consulting@web.de

### Redaktionsassistentin

Bettina Wagenhals  
Tel.: 06201/606-764  
bettina.wagenhals@wiley.com

### Fachbeirat

Dr. Hans-Erich Gasche,  
Bayer, Leverkusen  
Prof. Dr. Thomas Hirth,  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),  
Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann,  
TU Dortmund

Dipl.-Ing. Eva-Maria Maus,  
Fachhochschule Nordwestschweiz, Basel

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Peukert,  
Universität Erlangen-Nürnberg

Dr. Christian Poppe,  
Covestro, Leverkusen

Prof. Dr. Ferdi Schüth,  
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung,  
Mülheim

Prof. Dr. Roland Ulber,  
TU Kaiserslautern

### Erscheinungsweise 2025

10 Ausgaben im Jahr  
Druckauflage 20.000  
(IVW Auflagenmeldung:  
Q1 19.806 tvA)

### Bezugspreise Jahres-Abonnement 2025

10 Ausgaben 254,40 €, zzgl. MwSt.  
Schüler und Studenten erhalten  
unter Vorlage einer gültigen  
Bescheinigung 50 % Rabatt.  
Im Beitrag für die Mitgliedschaft bei der  
VDI-Gesellschaft für Chemieingenieur-  
wesen und Verfahrenstechnik (GVC) ist  
der Bezug der Mitgliederzeitschrift  
CITplus enthalten.

CITplus ist für Abonnenten der Chemie  
Ingenieur Technik im Bezugspreis enthal-  
ten. Anfragen und Bestellungen über den  
Buchhandel oder direkt beim Verlag (s. o.).

### Wiley GIT Leserservice

65341 Eltville  
Tel.: +49 6123 9238 246  
Fax: +49 6123 9238 244  
E-Mail: WileyGIT@vusevice.de  
Unser Service ist für Sie da von Montag  
bis Freitag zwischen 8:00 und 17:00 Uhr

Abbestellung nur bis spätestens  
3 Monate vor Ablauf des Kalenderjahres.

### Produktion

Wiley-VCH GmbH  
Boschstraße 12  
69469 Weinheim

### Bankkonto

J.P. Morgan AG, Frankfurt  
Konto-Nr.: 61 615 174 43  
BLZ: 501 108 00  
BIC: CHAS DE FX  
IBAN: DE55 5011 0800 6161 5174 43

### Herstellung

Jörg Stenger  
Melanie Radtke (Anzeigen)  
Ramona Scheirich (Litho)  
Andreas Kettenbach (Layout)

### Anzeigen

Zurzeit gilt die Anzeigenpreislise  
vom 1. Oktober 2022

Stefan Schwartze  
Tel.: 06201/606-491  
stefan.schwartze@wiley.com

Thorsten Kritzer  
Tel.: 06201/606-730  
thorsten.kritzer@wiley.com

Hagen Reichhoff  
Tel.: 06201/606-001  
hagen.reichhoff@wiley.com

### Sonderdrucke

Bei Interesse an Sonderdrucken,  
wenden Sie sich bitte an  
Stefan Schwartze,  
stefan.schwartze@wiley.com

### Originalarbeiten

Die namentlich gekennzeichneten Beiträge stehen  
in der Verantwortung des Autors. Manuskripte  
sind an die Redaktion zu richten. Hinweise für  
Autoren können beim Verlag angefordert werden.  
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte  
übernehmen wir keine Haftung! Nachdruck, auch  
auszugsweise, nur mit Genehmigung der Redakti-  
on und mit Quellenangaben gestattet.  
Dem Verlag ist das ausschließliche, räumliche und  
inhaltlich eingeschränkte Recht eingeräumt, das  
Werk/den redaktionellen Beitrag in unveränderter  
oder bearbeiteter Form für alle Zwecke beliebig  
oft selbst zu nutzen oder Unternehmen, zu denen  
gesellschaftsrechtliche Beteiligungen bestehen,  
sowie Dritten zur Nutzung zu übertragen. Dieses  
Nutzungsrecht bezieht sich sowohl auf Print- wie  
elektronische Medien unter Einschluss des Internet  
wie auch auf Datenbanken/Datenträger aller Art.

Alle in dieser Ausgabe genannten und/oder  
gezeigten Namen, Bezeichnungen oder Zeichen  
können Marken ihrer jeweiligen Eigentümer sein.

Unverlangt zur Rezension eingegangene Bücher  
werden nicht zurückgesandt.

### Druck

westermann DRUCK | pva  
Printed in Germany | ISSN 1436-2597



# WILEY-VCH



# Nachhaltigkeit Kreislaufwirtschaft Digitalisierung

## ACHEMAreporter 2024 – im Einsatz.

Vom 10. bis 14. Juni 2024 wird das Messegelände in Frankfurt am Main wieder zum Weltforum für die Prozessindustrie. Die Transformation in der Prozessindustrie zu einer klimaneutralen und ressourcenschonenden Produktion sowie die Digitalisierung auf allen Ebenen sind große Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Dafür stellen über 2.000 Aussteller bei der ACHEMA 2024 ihre neuen Produkte, Lösungen und Verfahren zur Diskussion.

**ACHEMA**  
**reporter**  
**gesucht!**

Wir suchen **ACHEMAreporter**, die die technischen Lösungen und Trends aufgreifen und von der ACHEMA berichten. Als ACHEMAreporter eingeladen sind Studierende der chemischen Verfahrenstechnik, des chemischen Apparate- und Anlagenbaus, der Mess- und Regeltechnik sowie der Pharma- und der Biotechnik. Auch bewerben können sich fachjournalistisch Interessierte mit einer technischen Vorbildung. Die Berichte publizieren wir auf dem Zielgruppenportal [www.chemanager-online.com](http://www.chemanager-online.com) sowie in den tagesaktuellen Newslettern.

**Interessenten melden sich bitte bei:**

[citplus@wiley.com](mailto:citplus@wiley.com) unter dem Stichwort „ACHEMAreporter“.



**Ihre Ansprechpartner:**

**Etwina Gandert**  
Chefredakteurin  
+49 (0) 6201 606 768  
[egandert@wiley.com](mailto:egandert@wiley.com)

**Bettina Wagenhals**  
Assistenz  
+49 (0) 6201 606 764  
[bwagenhals@wiley.com](mailto:bwagenhals@wiley.com)

ACHEMA2024

**CITplus**

CITplus – Das Praxismagazin für Verfahrens- und Chemieingenieure.

**Besuchen Sie uns auf der ACHEMA**  
Foyer 4.1, Stand A31

**WILEY** VCH