

# CITplus

10

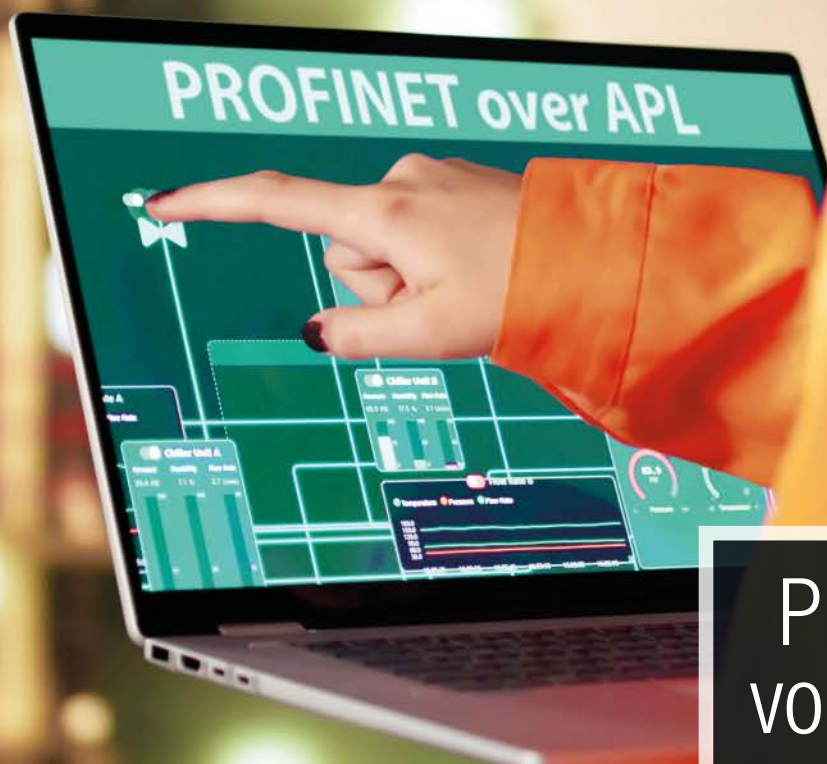
28. Jahrgang · Oktober · 2025

Das Praxismagazin für **Verfahrens- und Chemieingenieure**

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

**Sonderteil** Kreislaufwirtschaft

**Special** Batterierecycling



## Prozessindustrie vor dem Umbruch

**Ethernet-APL:  
Wegbereiter für die digitale Feldebene**

### Prozessanalysen- technik

Was die PAT zur Kreislaufwirtschaft beiträgt

**S. 20**

**Gut für den Kreislauf**  
Künftige Technologien  
für das Batterie-  
Recycling

**S. 28**

**Von der Richtlinie  
zur Verordnung**  
Neue EU-Maschinenverordnung  
2023/1230 in der Praxis

**S. 32**

**WILEY** VCH

# WILEY

Für Werbemaßnahmen auf unserem neuen Portal können Sie gerne ab sofort unser Sales-Team kontaktieren:

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

**Stefan Schwartz**  
sschwartz@wiley.com  
Tel.: +49 6201 606 491

**Thorsten Kritzer**  
tkritzer@wiley.com  
Tel.: +49 6201 606 730

Die Redaktion erreichen Sie unter:

**Dr. Etwina Gandert**  
Chefredakteurin CITplus  
egandert@wiley.com  
Tel.: +49 6201 606 768

**Dr. Roy T. Fox**  
Chefredakteur  
ReinRaumTechnik/  
Lebensmittel  
royfox@wiley.com  
Tel.: +49 6201 606 714



## Wiley Process Technology

**Wir präsentieren Ihnen unsere neue Online-Präsenz für die Prozess-industrie.** Hier finden Sie alle Informationen zu Themen rund um die Produktion in Chemie-, Pharma-, Life Science- und Lebensmittelindustrie. Wir berichten über innovative Anwendungen, neue Produkte, wichtige Branchenevents und veröffentlichen Nachrichten aus und für die Prozess-industrien. Unsere benutzerfreundliche Navigation und das moderne Design sorgen dafür, dass Sie schnell und einfach finden, was Sie suchen – und darüber hinaus viele wertvolle Informationen. **Schauen Sie sich um und entdecken Sie, was wir für Sie bereithalten!**

[processtechnology.wiley.com](http://processtechnology.wiley.com)

**CITplus**

**ReinRaumTechnik**

**LVT** LEBENSMITTEL Industrie

**WILEY**  
Process  
Technology

# Ideen, die wirken

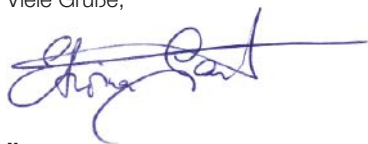
Liebe Leserin, lieber Leser,

auch wenn der Wirtschaftsmotor in Deutschland ins Stocken geraten ist, treiben Ingenieurteams Innovationen unermüdlich in die Anwendung. Zulieferer der Chemie- und Pharmabranche investieren zwischen 4 und 8 % des Umsatzes in F&E – Ergebnisse waren im September auf der Powtech Technopharm zu sehen. „Auf dem gesamten Messegelände war zu erleben: Europa ist innovativ“, resümierte Marianny Eisenhofer, Direktor Powtech Technopharm, nach der Veranstaltung. Gemeinsam mit der Fachpack zog das Messeduo rund 72.000 Fachbesucher nach Nürnberg. Parallel zu den Messen fand der renommierte, internationale Wissenschaftskongress Partec statt. Unter dem Motto „Particles Empowering Tomorrow: Innovationen für unsere globale Welt“ kamen rund 500 Teilnehmende aus über 20 Ländern zusammen, um mehr als 400 Beiträge in 30 Sessions zu diskutieren – hochkarätige Vorträge und Keynotes, Posterpräsentation und -preisverleihung. Die diesjährigen Posterpreise haben die Fachzeitschrift CIT und CITplus unterstützt. Sichtbar gefördert wurde der Nachwuchs durch zwei Wettbewerbe der VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC): ChemPlant, bei dem theoretisches Wissen und praktische Anwendungen in der Verfahrenstechnik gefragt sind, und ChemCar, ein Rennen zwischen Modellautos, die durch eine (bio)chemische Reaktion angetrieben werden – ausgetragen auf der Powtech Technopharm. Außerdem verlieh die VDI-GVC den Friedrich-Löffler-Preis an Dr. Vineetha Vinayakumar für ihre herausragenden Forschungsleistungen im Bereich der Partikeltechnologie. Die Ergebnisse der Wettbewerbe sowie ein Profil der Friedrich-Löffler-Preisträgerin werden wir in einer der nächsten Ausgaben von CITplus vorstellen. Für die nächste Partec in drei Jahren übernimmt Prof. Urs Peuker vom Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik an der TU Bergakademie Freiberg den Chair des Komitees. Wir – CIT und CITplus – freuen uns darauf.

Sehr viel näher liegen die nächsten Messe-Meilensteine: K, Hydrogen Expo und SPS. Auf der K im Oktober wird die Kunststoffbranche über Lösungen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft beraten. Dazu greifen wir in dieser Ausgabe von CITplus Aspekte wie chemisches Recycling im Sonderteil Kreislaufwirtschaft ab Seite 16 auf; ergänzend beleuchten wir Themen zum Batterierecycling ab Seite 28.

Den Auftakt dieser Ausgabe macht die Titelstory „Prozessindustrie im Umbruch“ zu Ethernet APL (S. 10). Sie zeigt, wie die digitale Feldebene Realität wird – und wo sich im Betrieb heute konkret Effizienz und Transparenz heben lassen. Hinweisen möchte ich Sie noch auf unsere kostenfreie Online-Veranstaltung „Digitalization in the Chemical Industry“ am 22. Oktober. Themen und AnmeldeLink finden Sie auf Seite 12.

Viele Grüße,



Ihre  
**Etwina Gandert**

Chefredakteurin  
etwina.gandert@wiley.com



**Etwina Gandert**  
Chefredakteurin

Wiley Online Library



PS: Wenn Sie die digitalen Ausgaben und aktuelle News nicht verpassen wollen, melden Sie sich gerne kostenfrei an zu unserem Newsletter von Wiley Process Technology.  
processtechnology.wiley.com

**Findeva**<sup>®</sup>  
Quality in vibrators

**Serie FPK**

**Die Innovation:  
Hochfrequenz-  
Klopfer und  
Vibrator in einem**

**FPK: Der Hybrid.  
Schneller als Klopfer,  
stärker als Linear-  
Vibratoren.**



**Findeva AG**

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

Pneumatische Vibratoren für die Industrie  
Loostrasse 2, CH-8461 Oerlingen,  
Schweiz. Tel. +41 (0)52 305 47 57  
Mail: [info@findeva.com](mailto:info@findeva.com)  
Deutschland: [www.aldak.de](http://www.aldak.de)  
Mail: [alsbach@aldak.de](mailto:alsbach@aldak.de)



PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.,  
Karlsruhe  
Tel.: +49 721 986 197 - 49  
barbara.weber@profibus.com  
www.profibus.com

# Prozessindustrie vor dem Umbruch

10

**Ethernet-APL: Wegbereiter für die  
digitale Feldebene**

Die Prozessindustrie steht am Beginn eines tiefgreifenden Wandels – getrieben durch Digitalisierung, Vernetzung und dem Anspruch, Anlagen effizienter und transparenter zu betreiben. Eine Schlüsselrolle spielt dabei Ethernet-APL, das von Geräteherstellern und Anwendern gleichermaßen getragen wird.

## KOMPAKT

- 6 Wirtschaft + Produktion
- 8 Forschung + Entwicklung
- 9 Termine
- 19 Podcast

## TITELSTORY

### 10 Prozessindustrie vor dem Umbruch

Ethernet-APL: Wegbereiter für die  
digitale Feldebene

S. Mühlenkamp, Profibus Nutzerorganisation

MESS-, STEUER-, REGEL-,  
AUTOMATISIERUNGS-,  
ANTRIEBSTECHNIK

### 14 Kleiner Unterschied mit großer Wirkung

Hocheffiziente Stromversorgung spart  
Energie und senkt CO<sub>2</sub>-Ausstoß

M. Köhler, Pepperl+Fuchs

### 15 Produkt

von Lanxess

## SONDERTEIL KREISLAUFWIRTSCHAFT

### 16 Kein Alleskönner, aber ein wichtiger Helfer

Kunststoffpyrolyse kann das Portfolio von  
mechanischen Recyclingverfahren ergänzen

Dr. K. Rübberdt und K. Wendler, Dechema

### 18 Vom Problemstoff zum Rohstoff

Pyrolysetechnologie für zirkuläre  
Kunststoffverwertung

Dr. A. Kurz, Pruvia

### 20 Was die Prozessanalysetechnologie zur Kreislaufwirtschaft beiträgt

Prozessanalysetechnik zur Prozessüber-  
wachung in Echtzeit – Fünf Praxisbeispiele für  
nachhaltige Prozesse und Produktsicherheit

Dr. T. Eifert, Covestro; Dr. M. Gerlach, Bayer;  
Dr. K. Dahlmann, Hamilton; Prof. Dr. B. Lendl, TU Wien;  
Prof. Dr. M. Rädle, TH Mannheim; Prof. Dr. M. Jaeger,  
HS Niederrhein; AK PAT, GDCh



# Kein Alleskönner, aber ein wichtiger Helfer

16

**Kunststoffpyrolyse kann das Portfolio von  
mechanischen Recyclingverfahren ergänzen**

- 26 Von Abfall zu wertvollem Kompost**  
Messtechnik für die Abfallbehandlung  
Jumo

- 25 Produkt**  
von R. Stahl

## SPECIAL BATTERIERECYCLING

- 28 Gut für den Kreislauf**  
Künftige Technologien für das  
Batterie-Recycling  
N. Soldan, PEM, RWTH Aachen
- 30 Recycling statt Rohstoffimporte**  
Europas Weg zur Batteriekreislaufwirtschaft  
Dr. D. Kubas, Endress+Hauser

## ANLAGEN | APPARATE | KOMPONENTEN

- 32 Neue EU-Maschinenverordnung:**  
**Von der Richtlinie zur Verordnung**  
Die Transformation der Maschinensicherheit  
im Zeitalter von KI und Digitalisierung  
C. Poppe, Covestro / VDI-GVC
- 36 Kältetechnik im Klimawandel**  
Zukunftssichere Kälteanlagen mit natürlichen  
Kältemitteln und innovativen Energiespar-  
techniken  
T. Imenkämper, L&R Kältetechnik
- 37 Produkt**  
von Flir

### Beilagen

Bitte beachten Sie die Beilage von  
RCT Reichelt Chemietechnik in dieser  
Ausgabe.

- 38 Bezugsquellenverzeichnis**

- 39 Index/Impressum**



# Fünf Minuten Kaffee- pause...

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

Effizienter und entspannter  
können sich Strategen und  
Entscheider der Chemie-  
branche nicht informieren!



<https://tinyurl.com/26g57bg>

**Jetzt ganz einfach  
kostenlos registrieren:**

[https://chemanager-online.com/  
de/newsletter/register.html](https://chemanager-online.com/de/newsletter/register.html)

**CHEManager.com**

## CIT<sup>plus</sup>

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**

### Willkommen im Wissenszeitalter

Wiley pflegt seine 200-jährige Tradition durch Partnerschaften  
mit Universitäten, Unternehmen, Forschungseinrichtungen,  
Gesellschaften und Einzelpersonen, um digitale Inhalte,  
Lernmittel, Prüfungs- und Zertifizierungsmittel zu entwickeln.  
Auch in Zukunft wird Wiley weiterhin Anteil an den Heraus-  
forderungen der Zukunft haben und Antworten geben, die Sie  
bei Ihrer Aufgabe weiterbringen.



WILEY VCH

# International Battery Production Conference

Die International Battery Production Conference 2025 (IBPC 2025) in Braunschweig ist eine zentrale Plattform für führende Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie, die die Zukunft der Batterieproduktion gestalten. Als Herzstück der Elektromobilität und erneuerbarer Energien steht die Batterietechnologie im Mittelpunkt globaler Forschung und Entwicklung. Auch 2025 setzt die Konferenz ihre Schwerpunkte auf innovative Produktionsmethoden, Automatisierung, Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Recycling. Angesichts des wachsenden Bedarfs an Batterien rücken effiziente und zirkuläre Produktionsprozesse stärker denn je in den Fokus. Ein besonderes Thema sind Festkörperbatterien, sowie Natrium-Ionen-Batterien, die als sichere, umweltverträgliche und leistungsfähige Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien gelten.

Vom 5. bis 6. November 2025 findet die IBPC, organisiert durch die Battery LabFactory der TU Braunschweig, im Steigenberger Parkhotel in Braunschweig statt. Ziel der Kon-

ferenz ist die Schaffung einer technisch-wissenschaftlichen Plattform auf hohem Niveau, auf der sich ca. 300 Fachleute aus der Industrie, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und akademische Mitarbeitende über neue Erkenntnisse zur Batterieproduktion austauschen können. Außerdem sollen das Verständnis für die bestehende Praxis gefördert und gleichzeitig eine Vergleichsbasis mit neuen Entwicklungen geschaffen werden. Die achte Ausgabe der Konferenz bietet Einblicke in aktuelle Entwicklungen, Trends und Forschungsergebnisse rund um die zirkuläre Batteriezellproduktion. Besonderer Fokus liegt hier auf der intelligenten Elektrodenherstellung und Zellproduktion von klassischen Lithium-Ionen-Batterien und Next-Generation-Batterien, der Trockenbeschichtung, dem Zelldesign, der Zellperformance sowie der Batteriesicherheit, der nachhaltigen Produktion, Recycling und Kreislaufwirtschaft und dem Batteriefabrikdesign mit den dazugehörigen Supply Chains.

Neben dem zweitägigen Konferenzprogramm mit fünf Keynotes, einer Panel Diskussion, rund 60 Präsentationen und 80 Postern bieten zwei Seminare, ein Grundlagen- und ein Expertenseminar, am 7. November 2025 die Möglichkeit, tiefgehende Erkenntnisse aus der Wissenschaft und der Industrie durch ausgewiesene Expertinnen und Experten zu Themen der Batteriezellproduktion und Nachhaltigkeit, Elektrodenfertigung, Festkörperbatterien und Digitalisierung zu erfahren. Ein internationales Scientific Committee aus weltweit anerkannten Batterieexpertinnen und -experten und die Kooperation mit dem Fraunhofer IST und dem VDMA Batterieproduktion ermöglicht es, die hohe Qualität der Konferenz sicherzustellen. Die Einbindung unserer Industriesponsoren-Ausstellung und Industriesessions ermöglicht zudem einen praxis- und industrienahen Austausch.

<https://battery-production-conference.de>



**INTERNATIONAL BATTERY  
PRODUCTION CONFERENCE**

5 to 6 November 2025

**We are looking forward to your participation!**

**IBPC 2025**

**5<sup>th</sup> to 6<sup>th</sup> November 2025**

**+ additional seminar day on the 7<sup>th</sup> of November**

**Steigenberger Parkhotel Braunschweig**

To stay updated

Please visit: <https://battery-production-conference.de/>

Follow us on LinkedIn: [www.linkedin.com/company/ibpc-2025/](https://www.linkedin.com/company/ibpc-2025/)



### Genehmigung für Lithium-Anlage übergeben

Am 9. September 2025 übergab Prof. Dr. Jan Hilligardt, Regierungspräsident, die Genehmigungsunterlagen für den Bau und Betrieb einer zentralen Lithium-Anlage (CLP) im Industriepark Höchst an die Geschäftsführer von Vulcan Energie Ressourcen, Thorsten Weimann und Carsten Bachg. Die Übergabe fand an der bestehenden Lithiumelektrolyse-Optimierungsanlage (CLEOP) statt, an der bereits Lithiumhydroxidmonohydrat (LHM) hergestellt wird. Die neue Anlage ist Teil der ersten beiden Projektphasen von Vulcan. In Phase eins wird Lithiumchlorid in Landau gewonnen und in Frankfurt-Höchst zu LHM verarbeitet. Die zweite Phase sieht eine Ausweitung der Lithiumgewinnung in der Rhein-Neckar-Region vor. Die Verarbeitung erfolgt mittels Elektrolyse unter Einsatz von Strom aus Tiefengeothermie. Laut Vulcan sollen in der ersten Projektphase jährlich bis zu 24.000 t LHM produziert werden – ausreichend für etwa 500.000 Batterien für Elektrofahrzeuge. Die Produktions- und Lagereinheiten in Frankfurt-Höchst sollen in der zweiten Phase erweitert werden.

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

### VDI vergibt Eugen-Hartmann-Preis 2026

Die VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) vergibt 2026 den Eugen-Hartmann-Preis. Mit dieser Auszeichnung werden besondere berufliche Leistungen sowie die Förderung der beruflichen Ausbildung junger Menschen aus der Mess- und Automatisierungstechnik und verwandten technischen Disziplinen gewürdigt. Ziel ist es, junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Ingenieurinnen und Ingenieure zu ermutigen, ihre Ergebnisse durch qualitätsvolle Veröffentlichungen einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen.

[gma@vdi.de](mailto:gma@vdi.de)

### Workflow für Kathodenaktivmaterialien

Hte hat erfolgreich mehrere Anlagen zur Herstellung von Kathodenaktivmaterialien an das ZSW Baden-Württemberg geliefert. Der komplette Workflow von Fällung über Kalzinierung bis Nachbehandlung ermöglicht die Produktion von bis zu 10 kg Feststoffmaterialien täglich. Das Projekt Powder-Up! verkürzt Entwicklungszyklen erheblich und stärkt die nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in Deutschland und Europa. Im Rahmen der Zusammenarbeit unterstützt Hte das ZSW mit einem vollständigen Workflow zur Herstellung von Kathodenaktivmaterialien (CAM) – von der Fällung über die Kalzinierung bis hin zur Nachbehandlung. Die Fällungsanlagen bringen den kommerziellen Prozess in den Labormaßstab und ermöglichen die reproduzierbare Synthese von bis zu 10 kg Feststoffmaterialien pro Tag. Die Kalzinierungsmodule erlauben durch Parallelisierung die gleichzeitige Verarbeitung von bis zu 50 Proben. Die Post-Treatment-Anlage bietet unter anderem die Möglichkeit zur automatisierten Waschung von Materialproben rund um die Uhr. Alle Einheiten sind mit leistungsstarker Software zur präzisen Prozesskontrolle ausgestattet. Neben der erfolgreichen Inbetriebnahme hat Hte umfassende Schulungen für das ZSW-Team durchgeführt und intensive Unterstützung beim Aufbau des Gesamtworkflows geleistet.

Am ZSW in Ulm hat die Entwicklung von Aktivmaterialien und Lithium-Ionen-Batterien lange Tradition. Die Testanlagen von Hte für den Aufbau eines Workflows zur Herstellung von Kathodenaktivmaterialien wurden als Teil des Projekts Powder-Up! erworben. Powder-Up! ist eine Pilotanlage des ZSW Ulm zur seriennahen Herstellung von Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien in industrierelevanten Chargengrößen – ein entscheidender Schritt für eine nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in Deutschland und Europa. Ermöglicht wurde Powder-Up! durch die großzügige Förderung des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt. „Die Zusammenarbeit mit Hte hat es uns ermöglicht, unsere Entwicklungszyklen deutlich zu verkürzen. In einem so wettbewerbsintensiven Markt wie der Batterieentwicklung ist dies extrem wichtig – und ein entscheidender Beitrag für den Produktionsstandort Deutschland,“ sagt Professor Dr. Markus Hölzle ZSW-Vorstandsmitglied und Leiter des Geschäftsbereichs Elektrochemische Energietechnologien.

[www.hte-company.com](http://www.hte-company.com)



## Wasser nachhaltig & effizient nutzen

- **Wasser wiederverwenden**
- **Biogas aus Abwasser gewinnen**
- **Anlagenbetrieb digitalisieren**

EnviroChemie GmbH

In den Leppsteinswiesen 9 · 64380 Rossdorf · [www.envirochemie.com](http://www.envirochemie.com)

**Standorte International:** Benelux · Bulgarien · Dänemark · Finnland · Großbritannien  
Irland · Marokko · Norwegen · Österreich · Polen · Schweiz · Schweden

Innovation für Wassertechnik

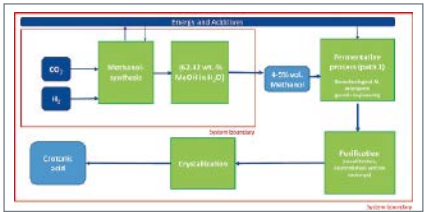




onlinelibrary.wiley.com

Ecologic and Economic Evaluation of Combined Methanol Synthesis from CO<sub>2</sub> and Biotechnological Upgrading to Value Products. Part 1: Environmental Impact

The conversion of waste biomass with green hydrogen into methanol and subsequent biotechnological conversion of this into valuable materials could be a promising value chain. Starting from biogenic CO<sub>2</sub> and green H<sub>2</sub>, methanol is produced in a first process path. This is then split into two separate process paths: methanol is used (i) in a biotechnological process with genetically modified bacteria to produce crotonic acid and (ii) to produce biomass protein. To evaluate the ecologically and economic benefits of both biological processes to the conventional production routes, first life cycle assessment and techno-economic assessment of biotechnological and chemical processes are accomplished. For this, a baseline scenario and several scenarios are calculated to investigate the influence of various parameters on environmental impact and economic efficiency. The results also identify the processes that are mainly responsible for costs and environmental impact, as well as the material, energy and waste flows, and process parameters that cause them. From this, measures and conditions for improving economic efficiency and environmental impact are derived.

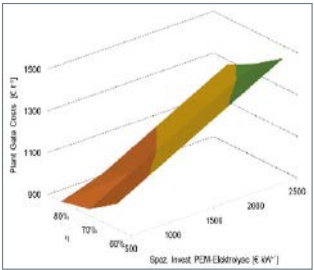


Ralf Ehret, Provadis School of International Management and Technology AG, Industriepark Höchst, Frankfurt am Main · ralf.ehret@provadis-hochschule.de · DOI: 10.1002/cite.202400004

Stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>-haltigen Abgasströmen aus der Kalkindustrie und Abfallverwertungsanlagen

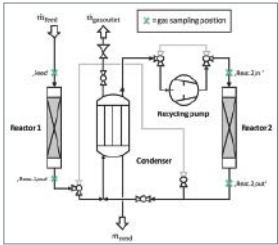
Mit dem Klimaschutzgesetz verpflichtet sich Deutschland, bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Für 2030 wird eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 65 % als Zwischenziel angestrebt. In etlichen industriellen Prozessen entsteht CO<sub>2</sub> jedoch systemimmanent, wie z. B. bei der Zement- und Kalkherstellung durch Freisetzung des im Kalk (CaCO<sub>3</sub>) gebundenen CO<sub>2</sub> sowie in thermischen Abfallverwertungsanlagen, die neben der Entsorgung einen erheblichen Beitrag zur Energieversorgung über die Bereitstellung von Fernwärme, Dampf und Strom leisten. Zur Erreichung der Klimaziele ist es erforderlich, das entstandene CO<sub>2</sub> aus den Abgasströmen abzutrennen. Durch eine stoffliche Nutzung als Baustein für einfache Kohlenwasserstoffe wie Methanol (MeOH) kann der Einsatz fossiler Rohstoffe reduziert, Emissionen in die Atmosphäre vermieden und im Idealfall ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf etabliert werden.

Prof. Dr.-Ing. Alexander May, Fachbereich Naturwissenschaften & Technik, Provadis School of International Management and Technology AG, Industriepark Höchst, Frankfurt am Main alexander.may@provadis-hochschule.de · DOI: 10.1002/cite.202300222



Development and Validation of a Laboratory-Scale Methanol Synthesis Mini-Plant and Digital Twin Simulation

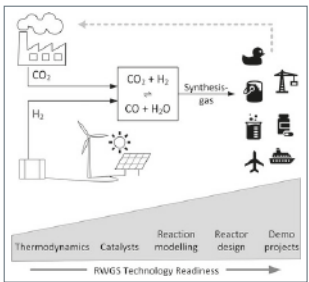
The utilization of CO<sub>2</sub> is becoming increasingly important for replacing fossil resources in the chemical industry. Methanol synthesis from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> can play a key role in providing a renewable base chemical. To develop full process concepts, a methanol mini-plant was set up, accompanied by a digital twin to investigate flexible feedstocks and the recycling of unconverted reactants, including product condensation. Experimental results showed good agreement with the digital twin, using recent kinetic models enabling systematic investigation of process parameters and their influence on in-loop gas composition to identify optimal reaction and feed gas conditions. Experiments with syngas from biomass gasification were conducted to assess the feasibility of industrially relevant CO<sub>x</sub> sources.



Prof. Bastian Etzold, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Chair of Power-to-X Technologies, Fürth bastian.etzold@fau.de · DOI: 10.1002/cite.202500045

Review on CO<sub>2</sub> Activation via Catalytic Reverse Water-Gas Shift Reaction

The reverse water-gas shift (RWGS) reaction offers a promising pathway for CO<sub>2</sub> utilization by converting CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> into CO and H<sub>2</sub>O. This review explores the thermodynamic challenges of the RWGS process, emphasizing the need for high temperatures to suppress side reactions such as methane and coke formation. For catalytic RWGS reaction, reaction mechanism and catalytic materials are discussed together with kinetic models to provide an insight into RWGS performance under varying conditions. Catalyst deactivation mechanisms, particularly metal sintering and coke deposition, are addressed, with strategies for enhancing catalyst longevity through material optimization. RWGS applications are discussed, demonstrating the potential for integrating RWGS into industrial settings.



Rafael Becka, Karlsruher Institute of Technology – KIT, Engler-Bunte-Institut Fuel Technology, Karlsruhe · rafael.becka@kit.edu · DOI: 10.1002/cite.70013

## Oktober 2025

|                                                              |                |                  |                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|----------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Meorga MSR Spezialmesse                                      | 15. Okt.       | Landshut         | Meorga, <a href="mailto:info@meorga.de">info@meorga.de</a> , <a href="http://www.meorga.de">www.meorga.de</a>                                     |
| Projektmanagement im pharmazeutischen Umfeld                 | 20. Okt.       | 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>                 |
| Battery Production Days (BPD)                                | 21. – 22. Okt. | Münster          | Campus Forum, RWTH Aachen, <a href="https://battery-production-days.de">https://battery-production-days.de</a>                                    |
| Hochvoltbatterien (Lithium-Ionen) für Nutzfahrzeuge          | 23. Okt.       | Essen und online | Haus der Technik, <a href="mailto:info@hdt.de">info@hdt.de</a> , <a href="http://www.hdt.de/seminare-workshops">www.hdt.de/seminare-workshops</a> |
| Karriereboost für Ingenieurinnen                             | 23. – 24. Okt. | Stuttgart        | VDI, <a href="mailto:seminar@vdi-fortbildungen.de">seminar@vdi-fortbildungen.de</a>                                                               |
| Lieferantenqualifizierung und Auditierung (Selbstinspektion) | 27. Okt.       | 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>                 |
| CPHI Europe 2025                                             | 28. – 30. Okt. | Frankfurt/Main   | Messe Frankfurt, <a href="http://www.cphi.com/europe/en/home.html">www.cphi.com/europe/en/home.html</a>                                           |

## November 2025

|                                                                                                                                                                               |                |                |                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IBPC – International Battery Production Conference                                                                                                                            | 05. – 06. Nov. | Braunschweig   | Battery LabFactory Braunschweig, TU Braunschweig, <a href="http://www.battery-production-conference.de">www.battery-production-conference.de</a>                  |
| Moderne Rietveld-Analyse in der praktischen Übung                                                                                                                             | 06. – 07. Nov. | 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>                                 |
| New Ways of Work                                                                                                                                                              | 10. – 11. Nov. | online         | VDI, <a href="mailto:seminar@vdi-fortbildungen.de">seminar@vdi-fortbildungen.de</a>                                                                               |
| PEMT 2025 – Annual Meeting of Process Engineering and Materials Technology                                                                                                    | 10. – 11. Nov. | Frankfurt/Main | Dechema, <a href="http://www.dechema.de">www.dechema.de</a> ,<br>Andrea Köhl, <a href="mailto:andrea.koehl@dechema.de">andrea.koehl@dechema.de</a>                |
| Organisation, Personal- und Projektmanagement                                                                                                                                 | 10. – 11. Nov. | 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>                                 |
| Non-target-Analyse mittels multidimensionaler Chromatographie oder Ionenmobilitäts-Massenspektrometrie                                                                        | 10. – 12. Nov. | Essen          | Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>                                 |
| Grundlagenkurs Emulsionstechnologie am Beispiel von Hautpflegeprodukten                                                                                                       | 11. – 12. Nov. | Krefeld        | Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>                                 |
| GMP-Intensivtraining: Hintergründe und Essentials der GMP (Gute Herstellungspraxis) auf deutscher, europäischer und amerikanischer Ebene – mit Praxisteil                     | 12. – 13. Nov. | 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>                                 |
| Chemometrik – Werkzeug in der Analytischen Chemie                                                                                                                             | 19. – 21. Nov. | Magdeburg      | Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>                                 |
| Business Model Design für komplexe Technologiesysteme in der Chemieindustrie                                                                                                  | 20. Nov.       | 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>                                 |
| Agiles Projektmanagement mit Scrum                                                                                                                                            | 20. – 21. Nov. | online         | VDI, <a href="mailto:seminar@vdi-fortbildungen.de">seminar@vdi-fortbildungen.de</a> ,                                                                             |
| 16. Jahrestreffen der Betriebsingenieure 2025                                                                                                                                 | 21. Nov.       | Wiesbaden      | VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen,<br>Dr. Ljuba Woppowa; Dipl.-Ing. Vivien Manning, <a href="http://www.vdi.de/gvc">www.vdi.de/gvc</a>  |
| 27. Symposium Strategien zur Sanierung von Boden und Grundwasser 2025                                                                                                         | 24. – 25. Nov. | Frankfurt/Main | Dechema, <a href="http://www.dechema.de">www.dechema.de</a> ,<br>Nina Weingärtner, <a href="mailto:nina.weingaertner@dechema.de">nina.weingaertner@dechema.de</a> |
| Methodenvalidierungen in der Analytischen Chemie unter Berücksichtigung verschiedener QS-Systeme                                                                              | 25. Nov.       | 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>                                 |
| SPS Smart Production Solutions                                                                                                                                                | 25. – 27. Nov. | Nürnberg       | Messe Frankfurt/Mesago, <a href="http://www.sps.de">www.sps.de</a>                                                                                                |
| NAMUR Hauptsitzung                                                                                                                                                            | 27. – 28. Nov. | Neuss          | NAMUR, <a href="http://www.namur.net">www.namur.net</a>                                                                                                           |
| Einführung in die Betriebswirtschaftslehre für Chemiker (m/w/d)                                                                                                               | 27. – 28. Nov. | Münster        | Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), <a href="mailto:fb@gdch.de">fb@gdch.de</a> , <a href="http://www.gdch.de">www.gdch.de</a>                                 |
| Intensivtraining zur Übernahme der Verantwortung für den Großhandel mit Arzneimitteln gemäß § 52a Arzneimittelgesetz und der „Verantwortlichen Person“ gemäß EU GDP Leitlinie | 28. Nov.       | 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>                                 |

## Dezember 2025

|                                                                                                                                    |                |                     |                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Herbstkolloquium Prozessanalytik 2025                                                                                              | 03. – 05. Dez. | Frankfurt/Main      | Dechema, Matthias Neumann, <a href="mailto:matthias.neumann@dechema.de">matthias.neumann@dechema.de</a>                                                |
| Aktuelle Trends der molekularbiologischen Lebensmittelanalytik                                                                     | 04. – 05. Dez. | Freiburg und 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>                      |
| Qualitätsmanagement im analytischen Labor                                                                                          | 04. – 05. Dez. | 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>                      |
| GeCatS Infoday "From Flow Chemistry to Continuous Processes: New Alternatives for Chemical Production on Laboratory and Ton Scale" | 09. Dez.       | Frankfurt/Main      | Dechema, <a href="http://www.dechema.de">www.dechema.de</a> ,<br>Simone Kinkel, <a href="mailto:simone.kinkel@dechema.de">simone.kinkel@dechema.de</a> |

Profinet over APL etabliert durchgängige Ethernet-Kommunikation bis zur Feldebene und ermöglicht den Einstieg in die digitale Prozessautomatisierung.



## Keywords

- **Ethernet-APL**
- **Profinet over APL**
- **Standardisierung**

# Prozessindustrie vor dem Umbruch

## Ethernet-APL: Wegbereiter für die digitale Feldebene

Die Prozessindustrie steht am Beginn eines tiefgreifenden Wandels – getrieben durch Digitalisierung, Vernetzung und dem Anspruch, Anlagen effizienter und transparenter zu betreiben. Eine Schlüsselrolle spielt dabei Ethernet-APL, das von Geräteherstellern und Anwendern gleichermaßen getragen wird.

Viele Prozessanlagen weltweit basieren noch immer auf klassischen 4-20 mA-Feldgeräten, bei denen zum Teil bereits HART Kommunikation eingesetzt wird. All das hat sich über Jahrzehnte bewährt, stößt jedoch bei der Digitalisierung an Grenzen und der Aufwand für Planung und Wartung ist relativ hoch. Ethernet-APL (Advanced Physical Layer) bietet nun eine technologische Lösung, um die Lücke zwischen moderner Ethernet-Kommunikation und den spezifischen Anforderungen der Prozessindustrie zu schließen. Erstmals ist eine durchgängige Kommunikation von der Feldebene bis in die Cloud möglich, eine unabdingbare Voraussetzung für die effiziente Digitalisierung von Prozessanlagen und ein sehr wichtiger Baustein für deren autonomen Betrieb.

Das Spannende ist: Ethernet-APL bringt die Ethernet-Kommunikation mit 10 Mbit/s in explo-

sionsgefährdete Bereiche der Prozessindustrie. Gleichzeitig stellt es die Energieversorgung über ein einziges, zweiadriges Kabel sicher. „Diese Kombination aus Leistung, Eigensicherheit und einfacher Topologie macht Ethernet-APL für die BASF besonders interessant“, erklärt Emanuel Trunzer, Senior Manager Automation and Electrical, bei BASF. „Bei uns liegt zunächst der Fokus auf Neuanlagen, aber auch in bestehenden Anlagenstrukturen lassen sich klassische Feldbusse ablösen und gleichzeitig neue digitale Konzepte realisieren.“

### Erste Großanlagenprojekte in Umsetzung

Dass die Technologie funktioniert, wurde inzwischen in umfassenden Pilotprojekten – u.a. in chemischen Großanlagen – bewiesen. Dort wurden Ethernet-APL-Netzwerke mit mehreren hundert Geräten verschiedener Herstel-

ler unter realen Bedingungen getestet. Die Ergebnisse sind überzeugend. So bietet der Ethernet-APL-Zugang jetzt eine stabile Kommunikation, hohe Verfügbarkeit, schnelle Konfiguration und eine verbesserte Fehlerdiagnose zur Instrumentierung im Feld der Prozessanlage. „Besonders das Verhalten bei Redundanzumschaltungen, Hot Swaps und Topologieänderungen wurde intensiv an aktuellen, verfügbaren Produkten geprüft – mit sehr positivem Feedback von den Anwendern“, bestätigt Michael Kessler, Executive Vice President Components & Technology bei Pepperl+Fuchs.

### Schritt für Schritt zu einer modernen Automatisierung

Auch bei der BASF wurden bereits sehr früh Tests im eigenen Labor durchgeführt. „Hier war das Ziel die Qualifizierung der Technologie sowie

das Sammeln praktischer Erfahrungen – von der Planung über die Installation bis hin zur Integration in die Systemarchitektur. Aufgrund der positiven Ergebnisse werden derzeit mehrere Großanlagenprojekte unter Verwendung der Ethernet-APL-Technologie umgesetzt“, nennt Trunzer die nächsten Schritte.

Im Vergleich zur klassischen Rangierung oder Feldbussystemen bietet Ethernet-APL deutliche Vorteile: Die Datenraten sind höher, die Infrastruktur einfacher, und die einheitliche Kommunikation erschließt neue Möglichkeiten für vorausschauende Wartung und Optimierung der Anlagen sowie einen einfacheren Betrieb, vom Asset Management bis hin zum Gerätetausch und auch hinsichtlich der aktuellen Dokumentation der Automatisierungssysteme. Der durchgängige Ethernet-Ansatz von der Leitwarte bis ins Feld erleichtert zudem die zukünftige Integration in digitale Plattformen und Cloud-Lösungen.

„Dabei ist die Einführung von Ethernet-APL für die BASF kein Selbstzweck, sondern Teil einer übergeordneten Strategie zur Modernisierung ihrer Automatisierungssysteme“, macht Trunzer deutlich. „Wir rollen Ethernet-APL derzeit global in mehreren Großanlagenprojekten aus und befinden uns damit bereits in der fortgeschrittenen Umsetzungsphase.“ Parallel dazu verfolgt BASF die Entwicklung neuer Ethernet-APL-fähiger Geräte durch ihre Lieferanten.“

### Aufgaben für die Gerätehersteller

Die Entwicklung neuer Geräte ist komplex, denn Ethernet-APL ist kein einfaches Add-on zu bestehenden Komponenten. Vielmehr handelt es sich um ein komplett neues Design, angefangen bei der Elektronik bis hin zur Firmware. Die Entwicklung von Ethernet-APL-fähigen Geräten war daher eine große technologische Aufgabe. „Eine der größten Herausforderungen liegt in der Miniaturisierung der Elektronik, insbesondere für eigensichere Produkte“, erklärt Kessler. Die Integration eines Ethernet-APL-Transceivers, eines Ethernet-Stacks und der Energieversorgung in einem kompakten Gerät für Zone 0 ist technisch anspruchsvoll. Es müssen Anforderungen an den Explosionsschutz mit thermischem Verhalten und EMV in Einklang gebracht werden. Denn die Ethernet-Kommunikation hat aufgrund der hohen Übertragungsgeschwindigkeit einen höheren Leistungsbedarf. Gleichzeitig ist beim Explosionsschutz durch Eigensicherheit die verfügbare Leistung streng limitiert. Hersteller müssen daher Geräte mit höchster Energieeffizienz entwickeln.

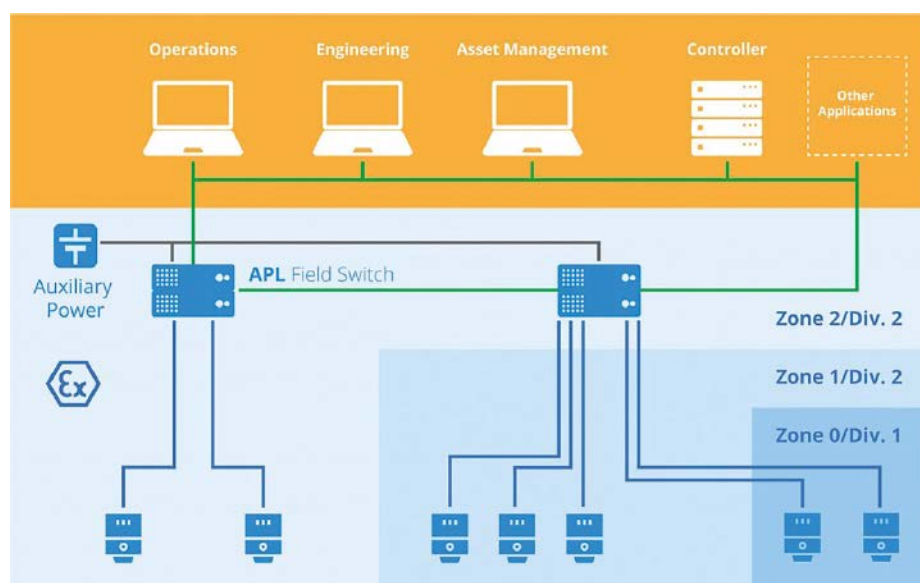
Außerdem wurden im Rahmen des APL-Projekts entsprechende Prüfstrategien und Prüfsysteme entwickelt, um die Übertragungsqualität und die EMV sicherzustellen. Das hilft Herstellern, Produkte im Haus bereits während der Entwicklung zu qualifizieren und damit den Aufwand und die Entwicklungszeit zu verkürzen.

Ein wichtiges Thema: Fast alle heute für Ethernet-APL verfügbaren Feldgeräte kom-

munizieren über Profinet – eine bewährte Technologie. Dabei gab es eine vielleicht nicht wirklich überraschende Herausforderung auf der Systemseite, die zwischenzeitlich gelöst ist: Während I/O-Module in der Leittechnik Messsignale mehrerer Instrumente unter einer Profinet-Adresse konsolidieren – im Falle des LB Remote I/O können das 184 analoge Prozesswerte sein – erhält und belegt jedes Feldgerät eine eigene Adresse. Diese hohe Anzahl an Knoten stellte bei einigen Implementierungen eine Herausforderung dar. Geräte- und Systemlieferanten haben auch diese Aufgabe adressiert und in enger Zusammenarbeit gelöst.

gebungen. „Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für Ethernet-APL war und ist die enge Zusammenarbeit zwischen Anwendern, Herstellern und Industriegremien“, so Tunzer. „Im Rahmen von Arbeitskreisen bei NAMUR, ZVEI und PI wurden Erkenntnisse aus der Praxis direkt eingebracht. Dadurch konnte die Entwicklung aktiv mitgestaltet werden.“

Profinet over APL verändert die Kommunikation grundlegend mit Durchgängigkeit bis in die Feldebene und markiert den Übergang in das digitale Zeitalter der Prozessautomatisierung. Mit robuster Zweidrahttechnik, hoher Datenrate, Ex-Schutz und Ethernet bis zum



**Die Kombination aus bewährter Zweidrahttechnik, hohen Datenraten, Explosionsschutz und Ethernet-Konnektivität direkt am Feldgerät eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten im industriellen Umfeld.**

### Enge Zusammenarbeit führt zum Ziel

Im Übrigen bedeuten die stabilen, international anerkannten Spezifikationen für die Kommunikation über Profinet und für den Advanced Physical Layer für den Gerätehersteller ein überschaubares Risiko bei der Implementierung und die Sicherheit ein marktgerechtes und vor allem interoperables Produkt anbieten zu können. „Die Profinet-Spezifikation passt perfekt zu den Anforderungen von Ethernet-APL und denen der Prozessindustrie. Die am Markt verfügbaren Geräte funktionieren gut“, bestätigt Kessler. „Das zeigen nicht nur die Skalierbarkeitstests bei Endress+Hauser, die zwischenzeitlich mit vier Leitsystemen erfolgreich abgeschlossen sind. Das beweisen auch die ersten großen Anlagen, davon eine mit mehreren zehntausend Feldgeräten, die gerade in Betrieb gehen.“

### Gute Aussichten – Profinet over APL wird Industriestandard

Profinet over APL ist nun auf dem besten Weg, sich als neuer Standard in der Prozessindustrie zu etablieren. Die Technologie verbindet moderne Ethernet-Kommunikation mit den Anforderungen prozesstechnischer Anlagenum-

feldgerät. Heute bisher noch unbekannte Applikationen werden damit im Feld realisierbar. „Eine Veränderung, die wir in dieser Größenordnung nur selten in der Prozessindustrie erleben können – eine Chance die jeder Hersteller ergreifen sollte“, so Kessler abschließend.

### Sabine Mühlenkamp,

Fachjournalistin für Chemie und Technik für Profibus Nutzerorganisation

Wiley Online Library



**PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe**  
Tel.: +49 721 986 197 - 49  
barbara.weber@profibus.com · www.profibus.com

WILEY

Virtual Event: October 22, 2025

Europe-wide,  
English-language  
virtual event

# DIGITALIZATION IN THE CHEMICAL INDUSTRY

Efficiency, Sustainability,  
and Innovation



How digitalization can  
increase energy and  
resource efficiency in  
plant operation in the  
chemical industry.

## PROPOSED SPEAKERS:

Renowned representatives from  
leading companies and industry  
associations, including:

BASF, Covestro, Evonik, Linde  
Engineering, Thyssenkrupp, Bilfinger,  
Schneider Electric, Siemens, ABB, and  
the VCI (Verband der Chemischen  
Industrie)

## TARGET AUDIENCE:

- Executives and strategic decision-makers
- Operations and plant managers
- Process and automation engineers
- IT and data specialists
- Maintenance and procurement professionals
- Innovation and R&D leaders

## KEY TOPICS:

- Real-time process optimization
- Predictive maintenance &  
plant availability
- AI-driven decision-making
- Energy & resource efficiency
- Safety, compliance, and innovation

### OPTION 1: **KEYNOTE SPONSORSHIP**

**€10,000**  
(excl. VAT)

Keynote Sponsorship plus a dedicated 40–45 min session, including 5–10 min for Q&A

Access to registration data for your session

Logo & company profile on the event page

Mention in all promotional materials

### **SPONSORSHIP OPPORTUNITIES:**

### OPTION 2: **SESSION SPONSORSHIP**

**€7,900**  
(excl. VAT)

Host a 40–45 min session, including 5–10 min for Q&A

Access to registration data for your session

Logo & company profile on the event page

Mention in all promotional materials

**Book your  
sponsorship  
now!**



### **REACH:**

The event will be promoted to a combined audience of over **100,000 professionals** across Europe through the CHEManager and CITplus networks, including:

- Print and digital editions
- Newsletters and editorial coverage
- LinkedIn campaigns and targeted email marketing

### **CONTACTS:**



**Stefan Schwartz**

Tel.: +49 (0) 6201 606 491  
sschwartz@wiley.com



**Hagen Reichhoff**

Tel.: +49 (0) 6201 606 001  
hreichhoff@wiley.com



**Thorsten Kritzer**

Tel.: +49 (0) 6201 606 730  
tkritzer@wiley.com

### **SPONSORED BY:**



### **ORGANIZED BY:**

**CHEManager** | **CITplus**



Die Auswirkungen der Effizienz einer Stromversorgung hat direkten Einfluss auf Lebensdauer, Größe und Zuverlässigkeit.

# Kleiner Unterschied mit großer Wirkung

**Hocheffiziente Stromversorgung spart Energie und senkt CO<sub>2</sub>-Ausstoß**

Eine Differenz von 1,8 Prozentpunkten beim Effizienzwert scheint nicht gerade bedeutend zu sein. Bei einer industriellen Stromversorgung ergibt sich daraus jedoch eine um rund 40 % höhere Verlustleistung, ein beträchtlich höherer Stromverbrauch und im vorherrschenden Strommix eine Vierteltonne zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Effiziente Stromversorgungen helfen Kosten zu senken, die Lebensdauer der Geräte zu verlängern und den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren.

Bei einer industriellen Stromversorgung rechnet man mit einer Lebensdauer von 15 Jahren, in denen praktisch keine Wartung nötig ist. Nach der Installation bleiben die allgegenwärtigen Geräte daher weitgehend unbeachtet. Dabei spielen sie nicht nur für das Funktionieren der Anlagen eine entscheidende Rolle. Da sie meist im 24/7-Betrieb arbeiten, hat ihre Leistung auch durchaus nennenswerte Auswirkungen auf den Stromverbrauch und damit auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Außerdem hängt die Eigentemperatur sowie die Temperatur im Schaltschrank von ihrer Verlustleistung ab. Je niedriger sie bleibt, desto länger halten die Geräte.

## Optimierung per Engineering und Komponentenwahl

Die Fortschritte in der Leistungselektronik haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass nahezu alle modernen Stromversorgungen über 90 % des aufgenommenen Stroms als Ausgangsleistung weitergeben können. Die Differenz zu den

100 % der Stromaufnahme bezeichnet die Höhe der Verlustleistung: Je nach Auslegung des Moduls können bis zu 10 % der eingesetzten elektrischen Energie als Wärme verlorengehen. Diese Wärmeabgabe führt zu einer entsprechend erhöhten Bauteil- und Gerätetemperatur, die wiederum die zu erwartende Standzeit der Stromversorgung deutlich reduziert. Ein Plus von 10 K führt erfahrungsgemäß bereits zu einer Halbierung der Produktlebensdauer.

Bei der Serie PS1000 wurde das Spektrum für Optimierung mit großem Aufwand für das Engineering ausgereizt. Dazu gehört die Verwendung von Komponenten und Technologien von hoher Qualität und optimalen Kennwerten. Als Resultat erreichen die Geräte in ihren jeweiligen Leistungsklassen Höchstwerte bei der Effizienz. So liegt z.B. die Ausgangsleistung der Stromversorgung PS1000-A6-24.10 von Pepperl+Fuchs mit 230 V bei 95,2 % der Stromaufnahme. Vergleichbare Geräte schaffen nur einen niedrigeren Effizienzwert von 93,4 %.

## Messbare Vorteile mit Skaleneffekt

Die scheinbar geringe Differenz von 1,8 Prozentpunkten hat erhebliche Auswirkungen. Das beginnt mit einer um 40 % höheren Verlustleistung des Vergleichsgeräts. Die deutlich stärkere Wärmeentwicklung erfordert außerdem ein wesentlich größeres Gehäuse, das mehr Platz auf der Hutschiene beansprucht. Zugleich hat die resultierende höhere Gerätetemperatur einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer – die größere Hitze beschleunigt die unvermeidlichen korrosiven Prozesse. Nicht zuletzt ist der Unterschied beim Stromverbrauch beträchtlich: Die zusätzliche Verlustleistung von 4,9 W (s. Tab. 1) summiert sich über eine 15-jährige Laufzeit zu einem Mehrverbrauch von 635 kWh Strom.

Bei einem derzeit realistischen Industriestrompreis von 0,265 EUR/kWh ergeben sich daraus auf die gesamte Betriebsdauer gerechnet zusätzliche Kosten von 168 EUR. Bei größeren Anlagen mit hunderten Stromversorgungen kommen leicht fünf- und sechsstelligen Summen zusammen, die sich mit einer optimierten Stromversorgung einsparen lassen. Auch die Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sind erheblich. Bei einem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 380 g/kWh – das entspricht derzeit etwa dem durchschnittlichen regionalen Strommix in Deutschland – resultiert der 1,8-Punkte-Unterschied in einer vermeidbaren zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emission von rund 0,25 t pro Stromversorgung über 15 Jahre. Auf die ganze Anlage hochgerechnet ergibt dies ein Einsparpotenzial, das für die Ökobilanz eines Unternehmens eine wichtige Rolle spielen kann – gerade im Hinblick auf die von der EU-Kommission vorgegebenen Klimaziele für 2030.

**Tab. 1: Vergleich der Stromversorgung PS1000-A6-24.10 von Pepperl+Fuchs mit einem vergleichbaren 240-W-Gerät.**

|                 | PS1000-A6-24.10 Stromversorgung | Vergleichsgerät 240 W | Anmerkungen                                           |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|
| Effizienz       | 95,2 %                          | 93,4 %                | -1,8 % Effizienz                                      |
| Verlustleistung | 12,1 W                          | 17 W                  | +40 % mehr Verlustleistung = 40 % mehr Wärme im Gerät |
| Baubreite       | 39 mm                           | 50 mm                 |                                                       |
| Volumen         | 0,57 l                          | 0,81 l                |                                                       |
| Gewicht         | 600 g                           | 894 g                 |                                                       |

### Breite Gerätepalette mit Ex-Schutz

Die Serie PS1000 umfasst Geräte mit ein- und dreiphasiger Stromversorgung. In verschiedenen Ausführungen und Leistungsklassen gewährleisten sie eine zuverlässige Spannungsversorgung mit 12 V DC, 24 V DC oder 48 V DC bei einer Ausgangsleistung von 5 bis 40 A. Außerdem steht ein DC/DC-Modul zur Verfügung, das als Repeater fungieren kann.

Die Geräte der PS1000-Serie sind für explosionsgefährdete Bereiche geeignet und verfügen über Zulassungen nach ATEX, IECEx sowie die Marine-Zulassung DNV. Sie sind auch für den nordamerikanischen Markt zertifiziert und können bis Zone 2/Div. 2 eingesetzt werden. Die Produktpalette umfasst außerdem spezielle Module zur Sicherung der Anlagenverfügbarkeit durch redundante Auslegung. Sie können sowohl in einer n+1- als auch in einer 1+1-Topologie eingesetzt werden.

### Funktionale Sicherheit und schlanke Lösungen

Bei einer redundanten N+1-Konfiguration verfügen mehrere Stromversorgungsmodule (Anzahl n) über ein Back-up-Stromversorgungsmodul (+1). Wenn ein Modul im System ausfällt, können die funktionierenden Module die Last weiterhin teilen, ohne die Integrität des Systems zu beeinträchtigen. Die Systemfunktion bleibt beim Ausfall eines Moduls erhalten. Bei 1+1-Konfigurationen ist jedes Modul redundant ausgelegt. In diesem Fall ist der Geräteausgang mit einem MOSFET ausgestattet, der anstelle von Dioden für die Entkopplung der beiden Eingangskanäle sorgt. Damit wird die Wärmeentwicklung und der Spannungsabfall zwischen Eingang und Ausgang reduziert. Die Serie PS1000 umfasst sowohl spezielle Redundanzmodule (PS1000-\*\*.RM) als auch Module

Tab. 2: Berechnung auf der Grundlage realistischer Annahmen zur Nutzung einer Stromversorgung.

|                                                                           |                |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Laufzeit einer Stromversorgung pro Tag                                    | 24 Stunden/Tag |
| Laufzeit einer Stromversorgung im Jahr                                    | 360 Tage/Jahr  |
| Lebensdauer der Anlage/Stromversorgung                                    | 15 Jahre       |
| Anzahl der Stromversorgungen                                              | 1              |
| Strompreis Industrie Deutschland 2023 [1]                                 | 0,2650 €/kWh   |
| CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor Strommix Deutschland 2023 <sup>[2]</sup> | 380 g/kWh      |

mit integrierter Redundanz (PS1000-\*\*.R). Letztere helfen im Schaltschrank Platz zu sparen.

Ohnehin zählen die PS1000-Stromversorgungen zu den kleinsten und leichtesten Geräten ihrer Klasse und haben einen entsprechend geringen Platzbedarf. Sie sind für Umgebungstemperaturen zwischen -25 °C und +70 °C ausgelegt. Mit der einstellbaren Ausgangsspannung lässt sich der Spannungsabfall auf langen Kabelstrecken kompensieren. Die Kombination der Module mit anderen Produkten von Pepperl+Fuchs im Schaltschrank – z.B. Trennbarrieren, Signaltrenner und Überspannungsschutzmodule – ist besonders einfach. Beim Anlegen der Eingangsspannung wird der Einschaltstrom aktiv begrenzt und so Netze und andere Geräte geschützt. Die „Peak Output Power“-Funktion ermöglicht zudem das beliebige Zuschalten großer Lasten wie Motoren und elektronische Geräte.

### Literatur

[1] Quelle: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Strompreisanalyse Juni 2023

[2] Quelle: Umweltbundesamt, Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2023



**Maximilian Köhler,**  
Product Portfolio Manager  
Innovation Unit Interface  
Technology, Pepperl+Fuchs

Wiley Online Library



Pepperl+Fuchs SE, Mannheim

Tel.: +49 621 776-0 · [www.pepperl-fuchs.com](http://www.pepperl-fuchs.com)

© Bilder: Pepperl+Fuchs

### Nachhaltiges Kautschukadditiv für die Reifenproduktion

Continental ist der erste Reifenhersteller, der das neue Kautschukadditiv Vulkanox HS Scopeblue von Lanxess einsetzt. Das Additiv ist eine nachhaltigere Variante des etablierten Vulkanox HS (TMQ) und wurde ISCC PLUS-zertifiziert. Es schützt Gummimischungen während der Vulkanisation vor Einflüssen wie Sauerstoff und Hitze. Die chemische Struktur des Additivs bleibt dabei unverändert, was eine Integration in bestehende Produktionsprozesse ohne Anpassungen ermöglicht. Im Vergleich zur konventionellen Variante weist Vulkanox HS Scopeblue einen um über 30 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf. Dies wird durch den Einsatz von biozirkulärem Aceton und die Nutzung erneuerbarer Energien in der Produktion erreicht. Die Herstellung erfolgt in einer massenbilanzbasierten, ISCC PLUS-zertifizierten

Anlage in Deutschland. Der Chemiekonzern verwendet zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks den Cradle-to-Gate-Ansatz, der direkte und indirekte Emissionen (Scope 1, 2 und 3) berücksichtigt. „Bei Continental arbeiten wir kontinuierlich daran, die Umweltbilanz unserer Produkte zu verbessern. Kooperationen wie die mit Lanxess und der Einsatz innovativer Kautschukadditive helfen uns, unserem Ziel näherzukommen, bis 2030 mehr als 40 % erneuerbare und recycelte Materialien in unseren Reifen zu verwenden“,



sagt Steffen Ryssel, Leiter des Einkaufs im Reifenbereich von Continental. Auch Lanxess sieht in der Zusammenarbeit einen wichtigen Schritt: „Wir freuen uns, dass Continental als Premiumhersteller für seine Produkte auf unser Vulkanox HS Scopeblue setzt. Das zeigt: Unsere innovativen Additive werden in der Industrie anerkannt und geschätzt“, so Dr. Jens-Hendrik Fischer, Leiter des Lanxess-Geschäftsbereichs Rhein Chemie. [www.lanxess.com](http://www.lanxess.com)

© Jozsef Szasz-Fabian/Getty Images/Stockphoto

# Kein Alleskönner, aber ein wichtiger Helfer

Kunststoffpyrolyse kann das Portfolio von mechanischen Recyclingverfahren ergänzen



## Keywords

- **Kunststoffrecycling**
- **Chemisches Recycling**
- **Pyrolyseöl**

BASF hat bereits 2019 im Rahmen ihres ChemCyclingTM-Projekts 20 Mio. EUR in Quantafuel investiert, ein Start-up-Unternehmen mit Sitz in Oslo, Norwegen. Quantafuel ist auf die Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen und die Aufreinigung des dabei entstehenden Öls spezialisiert. BASF speist das Pyrolyseöl aus der Anlage von Quantafuel in Skive in ihren Produktionsverbund in Ludwigshafen ein und stellt daraus neue chemische Produkte unter Anwendung eines Massenbilanzansatzes her. Diese Produkte weisen die gleiche Qualität auf wie Produkte aus fossilen Rohstoffen. BASF und Quantafuel arbeiten zudem gemeinsam daran, die Technologie von Quantafuel weiterzuentwickeln und zu optimieren.

Während nach Zahlen der GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung im Jahr 2023 mehr als 97 % der PET-Flaschen recycelt wurden, liegt diese Quote für Kunststoffabfälle insgesamt nach Angaben der Conversio-Studie „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023“ nur bei rund 39 %. Häufig handelt es sich um gemischte oder verschmutzte Materialströme. Kunststoffpyrolyse soll der Schlüssel dazu sein, auch solche Stoffe wieder in den Kreislauf zu bringen. Doch was kann sie wirklich leisten?

„Plastikabkommen gescheitert“ lauteten die Schlagzeilen im August 2025 nach den UN-Verhandlungen über die Eindämmung von Plastikmüll. Während die „High Ambition Coalition“, darunter Deutschland und die EU, auf eine Reduzierung der Plastikproduktion und vor allem den Verzicht auf Einwegprodukte drängen, plädieren die Rohstoffländer auf ein besseres Abfallmanagement und Recycling von Kunststoffen. Dabei wird auch immer wieder auf die Möglichkeiten des chemischen Recyclings verwiesen: Es soll bisher nicht wiederverwertbare Abfallströme zu Rohstoffen machen. Was ist dran an diesen Ideen – kann chemisches Recycling tatsächlich den Ausweg aus der Plastikkrise eröffnen?

## Pyrolyse ist technologisch machbar...

Wo das mechanische Recycling an seine Grenzen stößt, etwa bei verschmutzten oder gemischten Abfallströmen, soll chemisches Recycling liefern. Bei der Pyrolyse, einem der chemischen Recyclingverfahren, werden Kunststoffe unter Sauerstoffausschluss bei Temperaturen von etwa 400 bis 700 °C in kleinere Molekülketten zerlegt. Je nach Prozessführung entstehen dabei Pyrolyseöle, Gase und feste Rückstände. Verunreinigungen werden entweder verbrannt und aus dem Gasstrom abgetrennt oder bleiben im Feststoffanteil zurück. Die Zusammensetzung der Pyrolyseöle kann je nach Einsatzstoff und Prozessführung stark variieren. Im Idealfall lassen sie sich – je nach Qualität nach einer vorherigen Aufreinigung, z.B. mittels Destillation oder Hydrierung – als Rohstoff in Raffinerien und Steamcracker einspeisen und bilden die Grundlage für eine

Vielzahl chemischer Produkte und Kunststoffe in Neuwarenqualität. In den letzten Jahren ist eine Reihe von Pilot- und Demonstrationsanlagen in Betrieb gegangen, die prinzipiell die technologische Machbarkeit und Skalierbarkeit der Prozesse belegen.

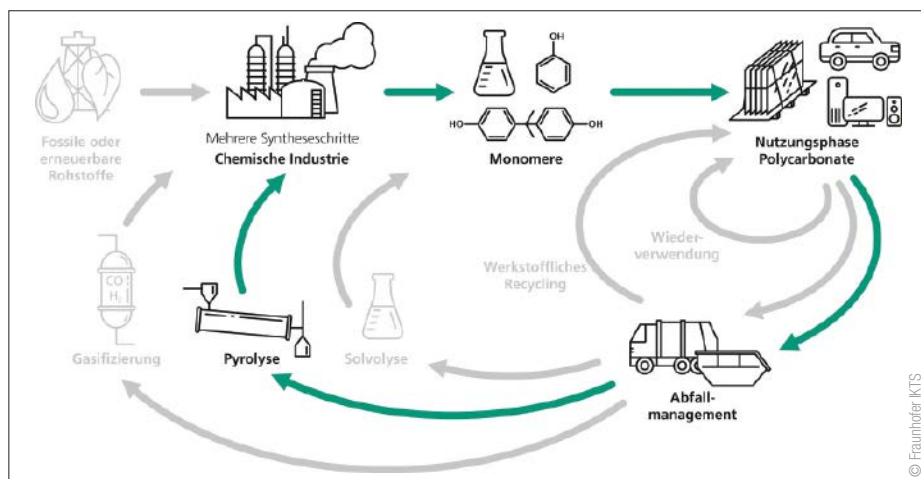
Mit der Pyrolyse lässt sich ein breiteres Spektrum an Abfallströmen stofflich verwerten als über mechanische Verfahren – bis hin zu Hausmüll oder Biomasse. Dadurch, dass die Produkte fossile Ressourcen am Anfang der Wertschöpfungskette ersetzen, können bestehende nachgelagerte Prozesse und Anlagen weiter genutzt werden, und eine breite Produktpalette ist zugänglich. Gleichzeitig kann die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen reduziert werden.

### ...aber ein paar Hindernisse sind noch auszuräumen

Doch so universell, wie es scheinen mag, lassen sich Pyrolyseverfahren dann doch nicht nutzen. Ein wesentliches Hindernis ist die schwankende Qualität der Pyrolyseöle, die stark von der Zusammensetzung des Inputmaterials abhängt. Besonders die Kunststoffströme aus Leichtverpackungsfractionen sind komplex zusammengesetzt und enthalten anhaftende Verunreinigungen. Auch Prozessparameter wie Temperatur, Druck, Sauerstoffausschluss oder Katalysatoren können zu sehr unterschiedlichen Pyrolyseölen führen. Hier ist noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit gefragt, um die Prozesse besser zu verstehen und die Qualität zu optimieren. Gleichzeitig trägt nicht jeder Steamcracker jedes Pyrolyseöl. Derzeit werden üblicherweise nur deutlich unter zehn Massenprozent Pyrolyseöl in Steamcrackern eingesetzt. Probleme bereiten insbesondere Verunreinigungen mit Halogen-, Silizium- und Heteroatomverbindungen sowie Metallen. Außerdem unterscheiden sich Pyrolyseöle in ihrer Zusammensetzung (z.B. höhere Anteile linearer oder verzweigter Olefine) stark von konventionellen, fossilen Rohstoffen. Daraus resultiert eine andere Spaltgas- und andere Produktzusammensetzung eines Steamcrackers. Diese Zusammensetzungen lassen sich bisher noch kaum modellieren, was einer Optimierung der Prozesse im Cracker im Weg steht.

### Ergänzung, nicht Ersatz

Für die großflächigere Nutzung in petrochemischen Prozessen müssen daher strenge Qualitätsanforderungen definiert und Standardisierungen vorangetrieben werden. Hinzu kommt der hohe Energiebedarf der Verfahren, der die ökologische Gesamtbilanz belastet. Nur durch Prozessoptimierungen, Wärmerückgewinnung und die Integration erneuerbarer Energiequellen lässt sich die Klimawirkung langfristig verbessern. Schon deshalb sollten mechanische Verfahren, wo immer möglich, den Vorzug bekommen. Chemisches Recycling kann aber eine entscheidende Ergänzung sein, um bislang ungenutzte Materialpotenziale zu erschließen.



Einordnung des chemischen Recyclings mittels Pyrolyse in ein ganzheitliches Recyclingkonzept.

Auch regulatorisch besteht noch erheblicher Klärungsbedarf: Auf europäischer Ebene wird derzeit diskutiert, inwieweit chemisches Recycling auf die verpflichtenden Recyclingquoten angerechnet werden darf. Unterschiedliche nationale Rahmenbedingungen verunsichern Investoren und verlangsamen den Ausbau der Technologie. Generell stellt sich die Frage, wie künftige Geschäftsmodelle aussehen könnten und wer die Betreiber der Pyrolyseanlagen wären. Hier bedarf es eines engen und langfristigen Austausches von Abfallwirtschaft und Chemieindustrie, um die Lücken in der künftigen Wertschöpfungskette zu schließen. Derzeit sind die Preise für Pyrolyseöle noch zu hoch und die verfügbaren Volumina zu niedrig, als dass sie bereits einen signifikanten Anteil an Cracker-Rohstoffen ausmachen könnten.

### Namhafte Unternehmen investieren in Pilotprojekte

Dass Unternehmen trotz dieser Hindernisse Potenziale sehen, zeigen die Investitionen der letzten Jahre: Die österreichische OMV hat ihre Anlage in Schwechat weiter ausgebaut und will künftig jährlich bis zu 16.000 t schwer recycelbare gemischte Kunststoffabfälle verarbeiten – das entspricht der jährlichen Kunststoffabfallmenge von 160.000 österreichischen Haushalten. Das Pyrolyseöl fließt in die Herstellung von Grundchemikalien und Verpackungen. In Geleen in den Niederlanden hat SABIC Plastic Energy Advanced Recycling (SPEAR), ein Joint Venture von Plastic Energy and SABIC, Ende August 2025 das erste selbst produzierte Pyrolyseöl präsentiert; die kommerzielle Produktion mit einem jährlichen Volumen von ca. 20.000 t Kunststoffabfall soll noch in diesem Jahr anlaufen. Die BASF bezieht von verschiedenen Unternehmen Pyrolyseöle für den Einsatz im Steamcracker. Shell hat Ende 2024 einen "Market Development Upgrader (MDU)" in Betrieb genommen. Er soll rund 50.000 t Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen produzieren, die als Feedstock in den Cracker in Moerdijk in den Niederlanden fließen.

Einen Ausweg für die globale Plastikverschmutzung bietet die Kunststoffpyrolyse jedoch

aus einem anderen Grund derzeit nicht: Sie setzt eine umfassende Sammlung von Kunststoffabfällen voraus, und genau daran hakt es derzeit in vielen Ländern der Welt. Für Europa allerdings kann sie ein wichtiger zusätzlicher Baustein in der Kreislaufwirtschaft werden, wenn es gelingt, technologische Innovationen mit wirtschaftlichen Anreizen und klaren politischen Leitplanken zu verbinden. Die kommenden Jahre werden zeigen, ob die Technologie in größerem Umfang den Sprung aus der Pilotphase in den großtechnischen Maßstab schafft und damit einen wesentlichen Beitrag zur Transformation hin zu einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Kunststoffwirtschaft leisten kann.

Dieser Trendbericht entstand auf Grundlage des Dechema-Statuspapiers Circular Economy, in dem viele weitere Aspekte und Stoffströme behandelt werden. Es ist kostenlos zum Download verfügbar unter [www.dechema.de/Statuspapier\\_Circular\\_Economy](http://www.dechema.de/Statuspapier_Circular_Economy)



**Dr. Kathrin Rübberdt,**  
Leiterin des Bereichs  
Wissenschaft und  
Industrie, Dechema



**Katja Wendler,**  
Leiterin des Fachbereichs  
Rohstoffe, Dechema

Wiley Online Library



DECHEMA e.V., Frankfurt

Dr. Kathrin Rübberdt · Tel.: +49 69 7564-205  
kathrin.ruebberdt@dechema.de · [www.dechema.de](http://www.dechema.de)

# Vom Problemstoff zum Rohstoff

## Pyrolysetechnologie für zirkuläre Kunststoffverwertung

Kunststoff ist allgegenwärtig und einer der vielseitigsten Werkstoffe. Er ist Garant für die heutige Lebensqualität und stellt zugleich eine der größten Umweltprobleme unserer Zeit dar. Jedes Jahr wird weltweit mehr als 400 Mio. t Kunststoff produziert – hauptsächlich aus fossilen Rohstoffquellen. Saubere und sortenreine Kunststofffraktionen können mechanisch recycelt werden. Die produzierten Rezyklate haben jedoch eine begrenzte Anwendbarkeit in kontakt-sensitiven und anspruchsvollen Applikationen. Sie erfahren zudem mit zunehmendem Additivgehalt und Verarbeitungszyklen starke Qualitätsverluste.



### Keywords

- **Energieeffiziente Pyrolyse**
- **Kreislaufwirtschaft**
- **Kunststoffrecycling**

© ISENGARD - stock.adobe.com

Verschmutzte heterogenen Kunststofffraktionen und Lamine sind mit etablierten Recyclingmethoden nicht zu verarbeiten und landen in der Regel entweder in der thermischen Verwertung (Verbrennung) mit entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emission oder zum Großteil weiterhin auf der Deponie. In beiden Fällen ist die Ressource Kunststoff einem linearen Prozess ausgesetzt, bleibt ungenutzt oder ist für immer verloren.

### Chemisches Recycling erzeugt neue Grundstoffe

Chemisches Recycling, insbesondere die Pyrolyse, bietet hier einen Ansatz für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft: Statt Kunststoffe werkstofflich zu verwerten, werden sie in einem thermischen Prozess aufgespalten und in sogenannte Pyrolyseöle konvertiert. Diese Pyrolyseöle können als Sekundärrohstoff in der petrochemischen Industrie fossiles Naphtha ersetzen und für die Herstellung von Grundstoffen der Plastikherstellung eingesetzt werden. Hierbei können eine Vielzahl an Kunststofffraktionen verwertet werden, insbesondere auch schwer verwertbare Mischkunststofffraktionen.

Doch der Weg vom Abfall zum kreislauffähigen Produkt ist technologisch anspruchsvoll. Die Pyrolyse ist ein endothermer Prozess, der bei Kunststoffabfall Temperaturen zwischen 400 °C und 550 °C unter Sauerstoffausschluss erfordert. Dabei werden langkettige Polymermoleküle in kürzere Fragmente gespalten. Das entstehende Pyrolysegas wird im Anschluss kondensiert, chemische und physikalische Eigenschaften werden hierbei durch die Verteilung der Ketten-

längen bestimmt. Neben der Zusammensetzung der Eingangsstoffe sind hierbei insbesondere Reaktionsparameter wie Pyrolysetemperatur, Homogenität des Temperaturprofils sowie Verweildauer und Druck ausschlaggebend.

### Höhere Temperaturen > 550 °C

- stärkere Zersetzung
- mehr kurzkettige Fragmente und nicht-kondensierbare Gase (C1–C4)

### Niedrigere Temperaturen <400 °C

- unvollständiges Cracken
- Bildung von langkettigen Paraffinen, Wachsen (C22+)

Pyrolyse als thermischer Prozess hat insbesondere zwei große Herausforderungen: Da ist zum einen die niedrige Wärmeleitfähigkeit von Kunststoff, die einen effizienten Energieeintrag verhindert. Und da ist zum anderen die Verkokung an den Wärmeübergangsflächen, dabei entsteht kohlenstoffhaltiger teerartiger Rückstand. Konventionelle Pyrolyseverfahren – etwa mit beheizten Rührkesselreaktoren – setzen auf indirekten Wärmeeintrag von außen. Dies führt zwangsläufig zu Temperaturgradienten im Reaktor, die wiederum zu inkonsistenten Crackprodukten führen: Bei zu niedrigen Temperaturen dominieren langkettige Paraffine und unvollständige Umsetzungen, bei zu hohen Temperaturen entstehen vorwiegend kurzkettige, teils nicht-kondensierbare gasförmige Verbindungen.

Gegenmaßnahmen wie die Rotation des Reaktorgefäßes oder interne Mischelemente

sollen diesen Effekten entgegenwirken – doch diese mechanischen Lösungen stoßen bei steigender Durchsatzleistung an physikalische und betriebliche Grenzen. Hinzu kommt die Problematik der Koksbildung an heißen Oberflächen und insbesondere an besagten Wärmeübergangsflächen. Solche Rückstände lagern sich kontinuierlich an, reduzieren damit den effektiven Wärmeeintrag und beeinträchtigen auch die Konvertierungsleistung. Vor allem aber stellen sie einen kontaminierten, hochkalorischen Abfallstrom dar, der technisch aufwendig abgetrennt und kostenintensiv gesondert entsorgt werden muss. Eine systematische Minimierung der Koksbildung ist daher nicht nur aus prozesstechnischer, sondern auch aus wirtschaftlicher und regulatorischer Sicht essenziell.

### Energieeffizientes und abwasserarmes Pyrolyseverfahren

Die Pruvia mit Hauptsitz in Fürth hat dafür ein neues Pyrolyseverfahren entwickelt. Mehr als 25 Jahre angewandte Forschung im Bereich der Vergasungs- und Pyrolysetechnologien durch Pruvia's technische Direktorin Prof. Dr. Maria Laura Mastellone waren hierbei ein äußerst solides Fundament für die ingenieurtechnische Umsetzungen. Das zentrale Element ist ein direkter Energieeintrag durch einen inerten granularen Wärmeträger. Dies erzeugt eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors. Damit lassen sich gezielt Pyrolysebedingungen schaffen und somit konstante Produktqualität gewährleisten. Die am Wärmeträger entstehende Verkokung wird in

Eine technisch schlanke, betrieblich stabile und wirtschaftlich skalierbare Lösung des innovativen Pyrolyseverfahrens wurde in einer Demonstrationsanlage im Chemiepark Leuna realisiert.

einem intrinsischen Prozessschritt energetisch verwertet, trägt wesentlich zur Verringerung des Energiebedarfs bei und muss somit nicht als Abfallstoff entsorgt werden. Des Weiteren fällt im gesamten Prozess kein nennenswertes Abwasservolumen an.

Dies sind zwei bedeutende Faktoren hinsichtlich technischer Skalierung und ökologischer Verträglichkeit. Pruvia spricht hier von der MLM-R-Technologie, welche die Initialen der Erfinderin trägt. Sie ist patentiert und hat sich bereits in einer Pilotanlage im Jahr 2020 in der Nähe von Neapel in Italien erfolgreich bewährt.

### Demonstrationsanlage in Leuna

In der verfahrenstechnischen Weiterentwicklung hat das Unternehmen den Fokus auf robuste Skalierung und kontinuierlichen Anlagenbetrieb gelegt. Das Resultat einer technisch schlanken, betrieblich stabilen und wirtschaftlich skalierbaren Lösung wurde in einer Demonstrationsanlage im Jahr 2023 im Chemiepark Leuna realisiert. Mit Unterstützung des dort ansässigen Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBPs wurden in zahlreichen Testkampagnen verschiedenste Mischkunststofffraktionen aus Haushaltsabfällen getestet. Der Schwerpunkt lag hierbei auf Polyolefinreichen Abfällen. Mit systematischer Prozessoptimierung konnte eine Produktausbeute zwischen 70 und 80 % bezogen auf den Eingangsstrom erzielt werden.

Über die Abfallcharakterisierung hinaus wurden im Rahmen des Demonstrationsbetriebs auch zentrale verfahrenstechnische Aspekte untersucht – insbesondere hinsichtlich Automatisierung, Prozessführung und Anlagenkonzept.



Im Zuge technischer Validierung durch Investoren sowie industrieorientierter Bewertungen wurde der technologische Entwicklungsstand entsprechend etablierter Kriterien mit TRL 8 eingestuft – ein zentraler Meilenstein auf dem Weg zur industriellen Umsetzung.

### Kommerzielle Anlage in Gendorf

Auf Basis der gesammelten Betriebserfahrungen und der Validierung des modularen Anlagenkonzepts befindet sich derzeit ein erstes kommerzielles Projekt im Chemiepark Gendorf in der Umsetzung. Die Anlage wird in zwei Ausbaustufen realisiert und soll nach Fertigstellung eine Verarbeitungskapazität von bis zu 70.000 t Kunststoffabfall pro Jahr erreichen. Mit der Standortwahl lassen sich bestehende Industrie- und Entsorgungsstrukturen einbinden sowie Synergien mit angrenzenden Betrieben nutzen. Damit schafft Pruvia die Grundlage für eine wirtschaftlich tragfähige und technisch skalierbare Lösung, um eine zirkulärer Wertschöpfung im industriellen Maß-

stab zu etablieren. Aufgrund der wirtschaftlich attraktiven Eckdaten, wie geringer Platzbedarf, niedrigem Investitionsbedarf in die Anlagentechnik und niedrigen Betriebskosten erfreut sich die robuste MLM-R Technologie einer hohen internationalen Nachfrage und Aufmerksamkeit.



**Dr. Andreas Kurz,**  
Chief Operating Officer,  
Pruvia

Wiley Online Library



**PRUVIA GmbH, Fürth**

Tel.: +49 911 285 00 - 918  
info@pruvia.com · www.pruvia.com

## Der CITplus Podcast-Tipp



### Willkommen im Circular Valley – Der Podcast für Kreislaufwirtschaft

In diesem Podcast geht es um Kreislaufwirtschaft/Circular Economy. Vertreterinnen und Vertreter aus dem Circular Valley Umfeld kommen zu Wort und berichten von Herausforderungen und Errungenschaften der Kreislaufwirtschaft. Die gemeinnützige Circular Valley Stiftung bringt die relevanten Stakeholder an einen Tisch. Branchen- und technologieübergreifend werden von Unternehmen, Start-ups, Wissenschaft und Politik gemeinsam Lösungen für die Transformation zur Circular Economy entwickelt. Öffentlichkeitsarbeit, der weltweit erste Circular Economy Accelerator und Politikempfehlungen sind die Arbeitsschwerpunkte der Stiftung. Hörer des Podcast dürfen interessante Interviewgäste, Einblicke in Unternehmen und Prozesse der Kreislaufwirtschaft sowie Wissenswerte und praktische Tipps für Wirtschaft, Privatpersonen und Institutionen erwarten. Die Episoden erscheinen alle 14 Tage und die Moderation übernimmt Philipp Ketteler. Fragen und Anregungen an: [podcast@circular-valley.org](mailto:podcast@circular-valley.org)

Listen on  
**Spotify**



Listen on  
**Apple Podcast**



**podcast.de**



# Was die Prozessanalysentechnologie zur Kreislaufwirtschaft beiträgt

## Prozessanalysetechnik zur Prozessüberwachung in Echtzeit – Fünf Praxisbeispiele für nachhaltige Prozesse und Produktsicherheit



Keywords

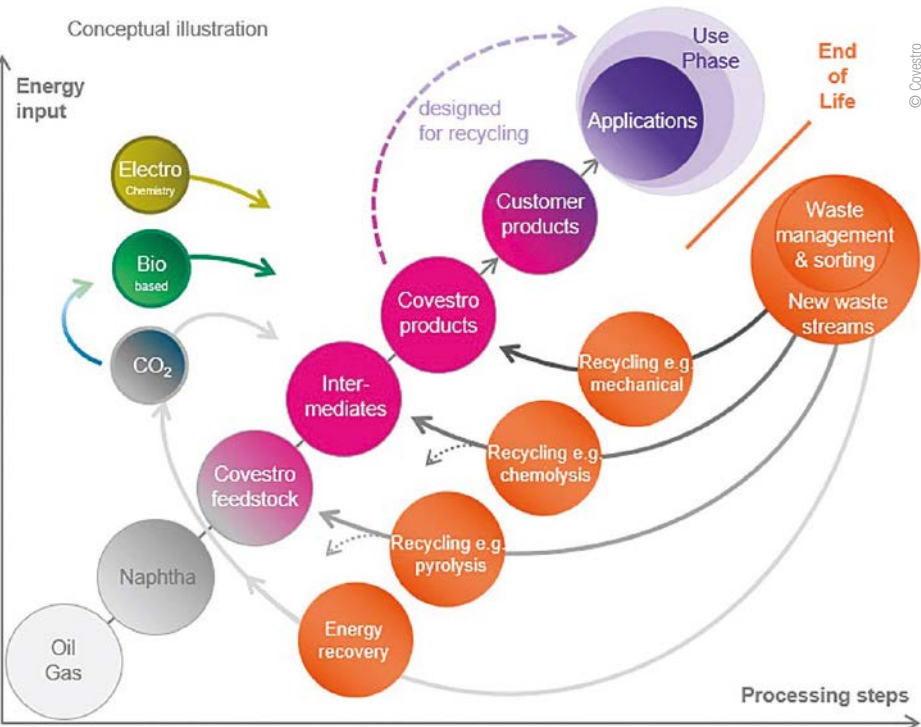
- Prozessanalytische Technologien (PAT)
- Prozesswasser
- Kreislaufwirtschaft
- Biotech- und Pharmaprozesse
- Echtzeitmessung

Prozessanalytische Technologien (PAT) tragen seit mehr als zwei Jahrzehnten dazu bei, industrielle Prozesse effizienter, nachhaltiger, sicherer und zuverlässiger zu machen. Echtzeitüberwachung ist der Schlüssel zur Prozesskontrolle, aber auch zum Prozessverständnis. Fortschritte in der Leistungsfähigkeit der Instrumente und in der Verfügbarkeit komplexer Datenanalysemethoden haben PAT zu einem grundlegenden Pfeiler der Quality by Design-Konzepte gemacht. Anlässlich des 20-jährigen Bestehens des Arbeitskreises PAT der GDCh sind in diesem Artikel Anwendungsbeispiele für und aus PAT-Applikationen zusammengestellt, die zu relevanten und zukunftsweisenden Prozessen beitragen oder beitragen werden.

Vor etwa 15 Jahren beschloss die Chemische Industrie, sich auf den herausfordernden Weg zu machen, grün und nachhaltig zu werden.<sup>[1]</sup> Gleichzeitig sah sich die analytische Chemie mit einer Endo- und einer Exo-Rolle konfrontiert: grün zu werden und die Chemische Industrie auf ihrem Transformationspfad zu unterstützen.<sup>[2,3]</sup> In einer breiteren Perspektive liegt die

vielsprechende Strategie zur Nachhaltigkeit in der Umwandlung unserer Wirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft mit ressourcenschonenden und effizienten Prozessen. Alternative Rohstoffe, Plattformchemikalien, innovatives Recycling, Upcycling, CO<sub>2</sub>-Bilanz und erneuerbare Energien bilden das Herzstück des neuen Wirtschaftsansatzes. Biotechnologische Pro-

zesse werden oft als bevorzugt angesehen.<sup>[4]</sup> Biobasierte Rohstoffe und Substratströme aus dem Recycling sind oft mit einer höheren Variabilität in der Zusammensetzung als herkömmliche Prozesse verbunden. Die sich daraus ergebenden Änderungen bestehender und die Entwicklung neuer Verfahren werden in hohem Maße von prozessanalytischen Technologien (PAT) abhängen, aber auch einen großen Einfluss auf ihre Leistung, ihre Anwendung und ihre Entwicklung haben. Darüber hinaus muss PAT die höhere Variabilität monitoren, um nachgeschaltete Prozesse zu ermöglichen oder zumindest die Auswirkungen komplexer Zusammensetzungen auf diese zu verringern. Grüne PAT – in beiden Rollen – entwickelt sich beschleunigt in Richtung schneller Monitoringmethoden, Multi-Informationen-Datenströme, Datenanalyse mit künstlicher Intelligenz (AI) oder maschinellem Lernen (ML), Feed-Back- und Feed-Forward-Prozesskontrolle.<sup>[5]</sup> Mit dem erwarteten Übergang zu kontinuierlichen Prozessen wird Echtzeitüberwachung noch wichtiger werden. Komplementäre Einweg-Batch-Reaktoren für biotechnologische Prozesse werden flexible und dennoch robuste PAT-Lösungen erfor-



◀ Abb. 1: Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft: Schließung von Material- und Kohlenstoffkreisläufen, wie sie von Covestro angestrebt wird; öl- und gasbasierte Verarbeitungsschritte (grau), biobasierte Prozesse (grün) und Prozesse, die auf Abfallmanagement und Recycling basieren (orange) <sup>[14]</sup>

dem.<sup>[6]</sup> Die Anzahl und Menge der Komponenten in zirkulär geführten Prozessen wird mit der Zeit zunehmen, sodass ein stets breiteres Spektrum an Informationen benötigt wird, um das Prozesswissen zu erwerben und zu besitzen, das für eine sofortige Steuerung ausreicht. Daher wird die spektroskopische Prozessmesstechnik an Bedeutung gewinnen, wobei der Wert des Beitrags von den aktuellen und langfristigen technologischen Fortschritten abhängen wird. Diese können für die verschiedenen Disziplinen sehr unterschiedlich ausfallen. Die aktuellen Trends wurden vor kurzem zusammengefasst.<sup>[7]</sup> Es wird jedoch erwartet, dass die Agglomeration, Anordnung oder Vernetzung von Sensoren in Verbindung mit KI eine wettbewerbsfähige Alternative zu Spektrometern darstellen wird, die manchmal mit kollektiver Intelligenz – oder Schwarmintelligenz – verglichen wird.<sup>[8-10]</sup>

In diesem Artikel werden Beispiele für nachhaltige Verfahren aus dem Recycling von industriellem Prozesswasser, Lösungsmitteln und Kunststoffen, aus der biotechnologischen Produktion mit Einweg-Batch-Reaktoren und aus der Bestätigung der Produktsicherheit, die sich künftig in der pharmazeutischen Produktion und Freigabe einsetzen ließen, präsentiert. Die Prozesse repräsentieren kontinuierliches, zirkuläres und Batch-Management. Die angewandte PAT-Methodik umfasst integrale Methoden wie die Online-Festphasenextraktion mit Ionenchromatographie-Leitfähigkeitsbestimmung (solid phase extraction-ion chromatography conductivity determination, SPE-IC-CD), die Impedanzspektroskopie (IS) und spezifische Methoden wie die Mittelinfrarot- (MIR), die Nahinfrarot- (NIR) Spektroskopie und den Quantenkaskadenlaser-Schwingungszirkulardichroismus mit externem Resonator (External Cavity Quantum Cascade Laser Vibrational Circular Dichroism, EC-QCL-VCD).<sup>[5,11-13]</sup> Anhand der besprochenen Beispiele wird ein Ausblick auf zukünftige PAT-Entwicklungen gewagt.

### PAT Anforderung aus der Schließung von Prozesskreisläufen von Abwasserströmen

Ein Weg zu Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz besteht in der vollständigen Zirkularisierung der Wertschöpfungskette der – chemischen – Industrie. Neue Prozesse mit inhärenter Kreislaufwirtschaft, wie in Abb. 1 dargestellt, müssen von öl- und gasbasierten Verarbeitungsschritten (grau) zu biobasierten Prozessen (grün) sowie zu Prozessen, die auf Abfallmanagement und Recycling basieren (orange), transformiert werden.

Für die Prozessindustrie bedeutet die Umstellung auf Kreislaufwirtschaft, neue Prozesse zu entwickeln, in die Kreislaufwirtschaft eingebaut ist, und die Stoffkreisläufe auch in den bestehenden Brownfield-Anlagen zu schließen. Dies ist in Europa und Deutschland besonders wichtig, da die bestehende Anlageninfrastruktur sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus ökologischen Gründen nicht abgeschafft werden sollte. Heute werden viele der großen Prozess-



Abb. 2: Während der Pilotphase speziell angefertigtes Online-SPE-IC-CD-System am Covestro-Standort Uerdingen

industriestandorte in Europa als Chemieverbund betrieben, wie z. B. in Ludwigshafen oder Antwerpen, wo ein Nebenprodukt oder Abfallstrom aus einer Anlage das Substrat für die nächste Anlage ist. Aus der Vogelperspektive betrachtet, verläuft der Prozess trotz der Verbundintegration immer noch recht linear. Dazu gehören kohlenstoffbasierte Produkte und die unverzichtbaren Nebenströme wie Salze oder aufbereitetes Wasser. Die dabei entstehenden hohen Salzkonzentrationen in den Abfallströmen könnten wiederverwendet werden und wären eine wertvolle Ressource. Um die Wasserströme vollständig zu nutzen, muss der geschlossene Wasserkreislauf die Spezifikationen des entsprechenden nachgeschalteten Prozesses erfüllen. Die Chlor-Alkali-Elektrolyse (CA-Elektrolyse) ist einer der größten industriellen Verbraucher von Salz für die Herstellung von Chlor, Wasserstoff und Natriumhydroxid – wesentliche Bausteine für die Herstellung zahlreicher Produkte. Die stark salzhaltigen wässrigen Ströme könnten recycelt und der CA-Elektrolyse zugeführt werden, wenn die hohen Anforderungen, d. h. an die Salzkonzentration der Sole, aber auch an die Konzentration bestimmter organischer Moleküle an die Reinheit des recycelten wässrigen Stroms gewährleistet sind. Die organischen Verunreinigungen einer vorgeschalteten Polymerproduktion müssen kontrolliert werden, da sie zu einer Spannungserhöhung oder Beschädigung des Elektrolysesystems führen können. Die daraus resultierende Messaufgabe besteht darin, den Nachweis im ppb-Bereich zu gewährleisten und zu verhindern, dass bestimmte Komponenten in die CA-Elektrolyse gelangen.

Zur Lösung dieser Messaufgabe wurde im Rahmen des Projekts RIKovery ein PAT-Kon-

zept entwickelt und in einer realen Anwendung am Covestro-Standort in Uerdingen erprobt.<sup>[15]</sup> Einer der kritischen Prozessparameter war die Konzentration einer quaternären Ammoniumverbindung. Die Verbindung musste vor der Messstelle entfernt werden. Um die Leistung des Reinigungsschrittes zu überwachen, wurde eine Methode entwickelt, die Ionenchromatographie in Kombination mit Leitfähigkeitsdetektion als extraktives Online-PAT-System verwendet. Nach dem ersten Inline-Filtrationsschritt wurde dem PAT-System eine Festphasenextraktion als Probenvorbereitung hinzugefügt, um die erforderlichen niedrigen Nachweisgrenzen von weniger als 0,5 mg/L in der 70 bis 100 g/L Natriumchlorid enthaltenden Salzwassermatrix zu erreichen. Das Online-SPE-IC-CD-System wurde an mehreren Stellen innerhalb der Reinigungseinheit installiert, siehe Abb. 2, und über einen Zeitraum von sechs Monaten erfolgreich getestet. Die Kombination von SPE und IC, wobei die Festphasenextraktion für die Matrixabtrennung und Anreicherung des Analyten und die Ionenchromatographie für die Trennung sorgt, erwies sich als robust und einfach zu handhaben. Ihre Leistung ist aufgrund der komplexen Matrices und der niedrigen Analytkonzentrationen erforderlich. Diese Bedingungen finden sich häufig bei der Rückgewinnung wertvoller Ressourcen aus Abfallströmen, können aber auch in der Kreislaufwirtschaft angewendet werden.

### NIR-Prozessüberwachung ermöglicht Lösungsmittelrückgewinnung

Ein anschauliches Beispiel für den Beitrag von PAT zum Recycling von Prozess-Lösungsmitteln ist die Rückgewinnung von Ethanol bei der Herstellung eines pharmazeutischen Wirkstoffs

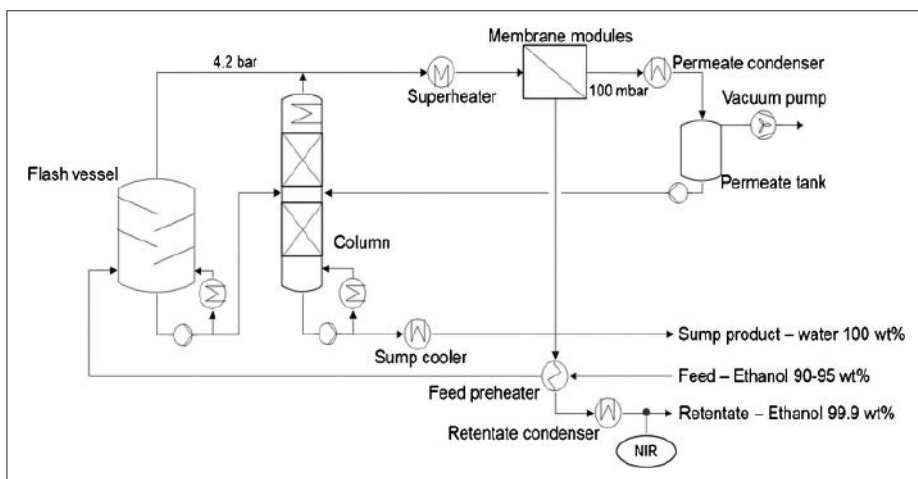


Abb. 3: Vereinfachtes Anlagenschema für eine Ethanol-Recyclinganlage

(active pharmaceutical ingredient, API).<sup>[16]</sup> Die Wiederverwendung von Ethanol trägt zur Kreislaufwirtschaft, zur wirtschaftlichen Effizienz, zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sowie zum Umwelt- und Klimaschutz bei.<sup>[17]</sup> Die erfolgreiche Rückgewinnung erfolgte mit einer Rate von fast 100 %. Bei der Wirkstoffsynthese wurde ein Ethanol-Wasser-Gemisch zurückgewonnen, dessen Ethanolgehalt typischerweise zwischen 90 und 95 % lag. Ein großer Teil des Gemisches wurde zunächst in einem Flashbehälter verdampft und anschließend bei einem Druck von 4,2 bar gasförmig an eine hydrophile Dampfpermeationsmembran der Membranmodule geleitet, siehe Abb. 3. Der Sumpf des Flashs wurde in eine Rektifikationskolonne geleitet, um das restliche Ethanol zurückzugewinnen. In der Kolonne wurde das restliche Ethanol über Kopf mit einer Reinheit von etwa 95 % als Azeotrop zurückgewonnen. Es wurde mit dem Flash-Destillat in Richtung der Membranmodule rekombiniert.

Bei bestimmungsgemäßem Betrieb befand sich am Boden der Säule ausschließlich Wasser. Möglicherweise waren auch einige Hochsieder vorhanden, die anschließend abgeleitet und in eine Kläranlage transferiert wurden. Bevor die Destillate die hydrophile Permeationsmembran erreichten, wurden sie überhitzt und gelangten als Gasphase zu den Membranmodulen. Das resultierende Retentat bestand aus denaturiertem Ethanol mit einem Wassergehalt von weniger als 0,1 Gewichts-%. Um Energie zu sparen, wurde der Feed durch eine Teilkondensation des Retentats vorgewärmt. Der Retentatkondensator verflüssigte das restliche Ethanol, das schließlich über einen Sammel-tank als Lösungsmittel in die chemische Reaktion zurückgeführt wurde.

Zur Überwachung der Ethanolqualität wurde eine NIR-Transmissions-Durchflusssonde hinter dem Retentatkondensator installiert, siehe Abb. 3. Eine optische NIR-Faser verband die Sonde mit einem NIR-Fourier-Transform (FT)-Spektrometer, das mit einem internen Multiplexer und einer Halogenlampe ausgestattet war, siehe Abb. 4. Die Anordnung diente der

kontinuierlichen Bestimmung des Wassergehalts. Um den maximalen Wassergehalt im Retentat unter der Spezifikation von 0,1 Gewichts-% zu halten, wurde die Zufuhr des Rückgewinnungssystems anhand der NIR-Analyse gesteuert. Der Wassergehalt wurde auf der Grundlage eines chemometrischen Modells unter Verwendung partieller kleinster Quadratregression (Partial least squares regression, PLS) mit einem Satz von etwa 40 Karl-Fischer-Titrationswerten als internem Referenzstandard berechnet. Das FT-NIR-Gerät lieferte etwa alle 40 s einen Messwert, was sich als ausreichend erwies. Um die Einhaltung der Spezifikationen zu gewährleisten, wurde der zulässige Wassergehalt durch die maximal entnehmbare Wassermenge in den Membranmodulen bestimmt. Sobald die auf die Membranen zuströmende Wassermenge deren Trennkapazität überstieg, wurde die Belastung der Membranen auf der Grundlage der PAT-Überwachungsdaten automatisch reduziert.

Der Beitrag zur Kreislaufwirtschaft aus den Emissionen nach Scope 1, d.h. direkt durch



Abb. 4: NIR-Sonde in einem Rohr der Ethanol-Recyclinganlage

Bayer verursacht, kann aufgrund der vermiedenen Verbrennung von Ethanol-Lösungsmittelabfällen auf ca. 8800 t CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt werden.<sup>[17]</sup> Bei den Scope 3-Emissionen, die nicht durch Bayer verursacht wurden, wurde eine Einsparung von ca. 5.750 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr ausgewiesen. Darüber hinaus ist der wirtschaftliche Nutzen der Ethanol-Rückgewinnung in den letzten Jahren durch den deutlichen Anstieg des Ethanolpreises gewachsen.

Zusammengefasst führt eine vollständige Ethanol-Rückgewinnung von ca. 6.000 t pro Jahr nun zu einer deutlichen Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Insbesondere der Einsatz von NIR-Messtechnik zur Prozesssteuerung sorgt für Kosteneffizienz durch eine deutlich verbesserte Prozessführung und leistet damit einen wertvollen Beitrag für unsere Umwelt und Klimaneutralität.

### Entwicklungen in der Mittelinfrarotspektroskopie zur Materialerkennung für schnelle Sortiervorgänge

Bei Industrie- und Siedlungsabfällen kommen häufig verschiedene Arten und Formen von Kunststoffen vor. Für deren Recycling muss die Art des Kunststoffs identifiziert und nach seiner chemischen Beschaffenheit getrennt werden. Besonders wichtig ist es, PVC zu erkennen und vom restlichen Kunststoff zu separieren, da es Korrosion an Metallteilen hervorruft und daher eine große Gefahr für die Verarbeitungsanlagen darstellt. Auch Nicht-Kunststoffmaterialien, die in der Regel zwischen 10 µm und 20 mm Durchmesser anfallen, müssen in den Abfällen erkannt werden. Die spektroskopische Differenzierung ist hier eine probate Methode. Jedoch ist der für die Messaufgabe zu wählende Spektralbereich entscheidend. Die auf ultraviolettem Licht basierende Spektroskopie bspw. ist nicht ausreichend selektiv und viele Kunststoffe sind aufgrund von Additiven schwer zu identifizieren. Auch im sichtbaren Spektralbereich ist eine Unterscheidung kaum möglich, da Kunststoffe in der Regel eingefärbt und damit für die Messgeräte nicht erkennbar sind. Die zugesetzten organischen Farbstoffe haben definierte Chromophore im sichtbaren Bereich, absorbieren aber nicht im NIR- und MIR-Bereich. Selbst bei schwarz gefärbten Textilien zeigen die Chromophore im NIR-Bereich keine Absorption. Daher erweisen sich NIR und MIR als geeignete Bereiche für Analyse- und Überwachungsaufgaben.

Bislang wurde die NIR-Spektroskopie häufig genutzt, da es schnelle Detektoren auf der Basis von Indium-Gallium-Arsenid-Pin-Dioden gibt, die oft als PIN-Dioden-Zeilenspektrometer realisiert wurden. Die analytischen Überwachungssysteme müssen jedoch mit einer multivariaten Datenanalyse kombiniert werden, was umfangreiche Datenmengen und ein aufwändiges Training erfordert. Aufgrund der begrenzten Auflösung und Selektivität der NIR-Spektroskopie weisen verschiedene Kunststoffe überlappende spektrale Banden auf, die

nicht univariat ausgewertet werden können. Aus spektroskopischer Sicht ist der MIR-Bereich aufgrund seiner extrem hohen Selektivität sowohl für Kunststoffe als auch für andere Verbindungen und Oberflächen wie organisches Gewebe, Metalle und anorganische Materialien vorteilhafter. Bisherige Einschränkungen bestanden darin, dass Oberflächen nicht gleichzeitig mit ausreichender Selektivität, hohem Kontrast und vor allem hoher Geschwindigkeit gescannt werden konnten. In den letzten Jahren konnten hier entscheidende Vorteile erreicht werden.<sup>[18]</sup>

Abbildung 5 zeigt eine schnell scannende MIR-Anordnung zur Charakterisierung von Kunststoffen in Abfallströmen.<sup>[18]</sup> Das Gerät verwendet vier Wellenlängen, die so ausgewählt sind, dass die interessierenden Komponenten spektroskopisch getrennt und damit gleichzeitig identifiziert werden können. Die Technologie ermöglicht eine kontrastreiche Oberflächenerkennung. Die Scangeschwindigkeit beträgt 3 Mio. Pixel pro Sekunde bei einer räumlichen Auflösung von 10 µm. Mit dieser Leistung können Partikel, Kunststoffteile und sogar grobe Granulate mit einer Größe ab etwa 50 µm erkannt werden. Sobald die Komponenten charakterisiert sind, wird eine mechanische Trennung durch einen Luftstrom erreicht. Die Luftdüsen und der Luftstrom werden auf der Grundlage der Ergebnisse der MIR-Überwachung gesteuert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rückgewinnung von Kunststoffen als Rohstoff in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. MIR-Techniken mit schneller Abtastung werden hohe Selektivität und Oberflächenidentifizierung für Kunststoffe und Materialien mit ausreichender Geschwindigkeit für die mechanische Trennung bieten.

### PAT als Treiber für Nachhaltigkeit in Bioprozessen

Biotechnologische Prozesse spielen eine entscheidende Rolle bei der Herstellung von Arzneimitteln, Biokraftstoffen und Lebensmittelzutaten. Die Umstellung von Edelstahl auf Einwegtechnologien (Single-Use Technologies, SUT) hat die Nachhaltigkeit bereits verbessert, da die Notwendigkeit der Reinigung vor Ort (Cleaning-in-place, CIP) und der Sterilisation vor Ort (Sterilization-in-place, SIP) entfällt, wodurch der Wasser- und Energieverbrauch reduziert wird. Gleichzeitig wird das Risiko von Kreuzkontaminationen gesenkt, während eine größere Prozessflexibilität, kürzere Chargenumlaufzeiten, ein kleinerer Platzbedarf und geringere Kapitalinvestitionen ermöglicht werden.<sup>[19]</sup>

Die Einwegtechnologie ist jedoch nur ein Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Produktion. PAT bringt diesen Weg weiter voran, indem sie die Ressourcennutzung optimiert und die Abfallmenge minimiert. Inline-Sensoren werden in der biopharmazeutischen Produktion häufig zur Überwachung kritischer Parameter wie pH-Wert, gelöster Sauerstoff und Metaboliten eingesetzt, um ein effizientes Zellwachstum

zu gewährleisten und Chargenausfälle zu reduzieren. Geeignete Metaboliten-Sensoren wurden als genetisch kodierte, elektrochemische, optische und enzymatische Sensoren realisiert. Beschrieben wurde eine Echtzeitüberwachung, die zu einem um bis zu 30 % geringeren Materialverbrauch und einem geringeren Kontaminationsrisiko führte.<sup>[20,21]</sup> Während die Kontrolle des pH-Werts und des gelösten Sauerstoffs bereits in hohem Maße automatisiert und in die Arbeitsabläufe von Bioprozessen integriert ist, wird die Anwendung der Impedanzspektroskopie und der kapazitätsbasierten Zellüberwachung noch nicht ausreichend genutzt, so dass hier noch erhebliches Potenzial besteht.<sup>[22-24]</sup>

Darüber hinaus wurde PAT eingesetzt, um die Prozesseffizienz in Fed-Batch- und Perfusionsystemen zu verbessern. Durch die präzise

gleichzeitig den Rohstoffabfall.<sup>[26]</sup> Die Lebensmittelindustrie profitiert von der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR), um die Verwendung von Zutaten zu optimieren und so Lebensmittelabfälle und den Energieverbrauch zu reduzieren.<sup>[27]</sup>

In Zukunft wird die Rolle der PAT noch weiter an Wichtigkeit gewinnen. Aufstrebende Technologien wie künstliche Intelligenz (KI), maschinelles Lernen und digitale Zwillinge werden zunehmend in PAT-Systeme integriert und vorausschauende Kontrollstrategien und Entscheidungsfindung in Echtzeit ermöglichen. Diese Entwicklungen werden neue Möglichkeiten für adaptive Bioprozesse eröffnen, bei denen die Systeme autonom auf veränderte Prozessbedingungen reagieren, um eine optimale Leistung aufrechtzuerhalten.<sup>[28]</sup> Darüber hinaus wird die fortschreitende Miniaturisierung

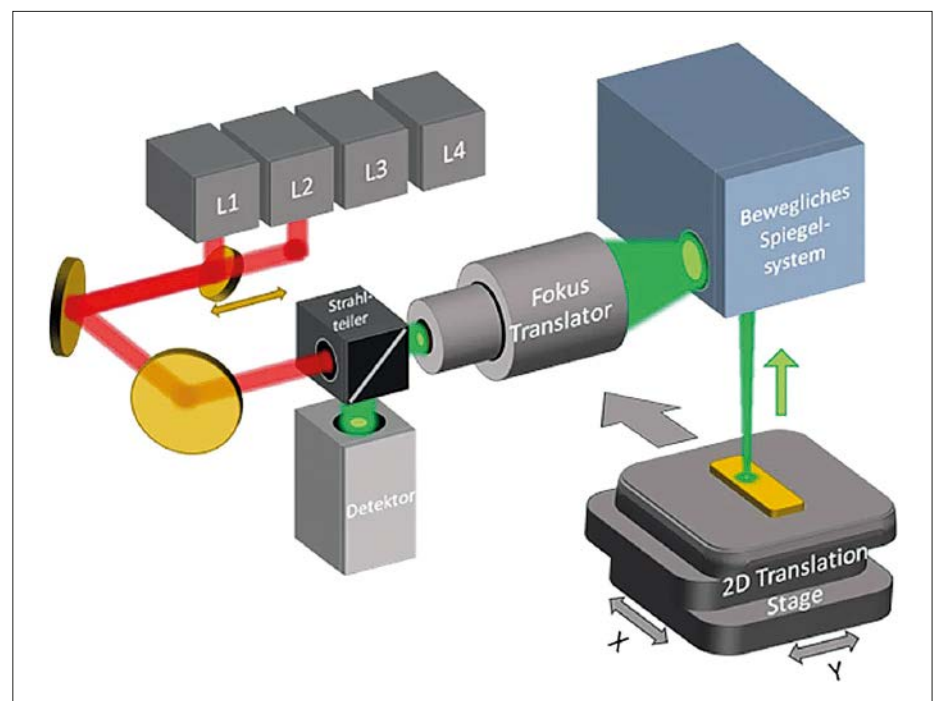


Abb. 5: IR-Schnellabtaster mit  $3 \times 10^6$  Messpunkten/Sek. zur Kunststofferkennung <sup>[18]</sup>

Steuerung der Nährstoffzufuhr konnte übermäßiger Medienverbrauch minimiert und gleichzeitig die optimale Lebensfähigkeit der Zellen erhalten werden. Dadurch wurde nicht nur der Rohstoffverbrauch gesenkt und die Lebensdauer der Kulturen verlängert, sondern auch der gesamte ökologische Fußabdruck verringert. Bei Perfusionsprozessen wurden die Prozesszeiten verkürzt, der Materialverbrauch reduziert und die Kosten gesenkt. Gleichzeitig wurden höhere Zelldichten erreicht, was zu einer höheren Produktausbeute und -qualität führte – und das alles bei einem geringeren Produktionsvolumen.<sup>[25]</sup> PAT bietet somit einen komplementären Ansatz, der sowohl die Effizienz als auch die Nachhaltigkeit stärkt. Auch andere Branchen nutzen PAT für Nachhaltigkeit. In der Biokraftstoffproduktion erhöhte die PAT-gesteuerte Fermentationskontrolle die Ethanolausbeute und minimierte

und Modularisierung der Sensortechnologie dezentrale und agile Herstellungskonzepte unterstützen, was der wachsenden Nachfrage nach flexiblen, kleinen Produktionseinheiten in der personalisierten Medizin und der Biologika-Herstellung auf Abruf entspricht.<sup>[21]</sup>

### Schwingungszirkulardichroismus zur Enantiomeren Diskriminierung

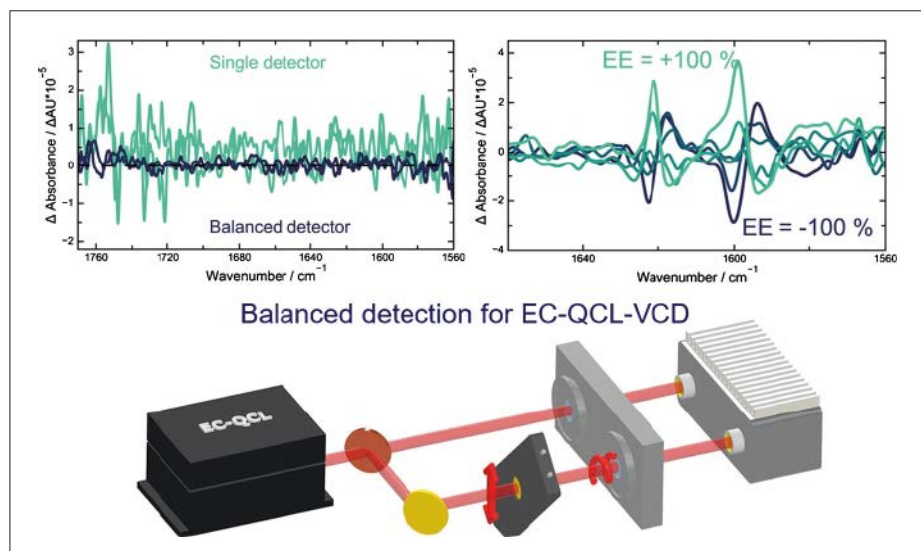
Aufgrund der unterschiedlichen pharmakologischen Wirkungen von Enantiomeren ist die Charakterisierung chiraler Arzneimittel seit 1992 von der Food and Drug Administration (FDA) und seit 1994 von der Europäischen Arzneimittelagentur (EMA) vorgeschrieben.<sup>[29]</sup> Dies hat Fortschritte bei der asymmetrischen Synthese und bei chiralen Analysetechniken bewirkt, sodass Enantiomerenreinheit in Produktion und Qualitätskontrolle überwacht und sichergestellt

werden können. Herkömmliche chirale Analyseverfahren wie Röntgenkristallographie und Kernspinresonanz (NMR) sind jedoch zeitaufwändig und für eine Prozessüberwachung in Echtzeit ungeeignet, so dass sie mit PAT-Anforderungen weitgehend inkompatibel sind.

Schwingungszirkulardichroismus ist eine leistungsstarke Technik zur Bestimmung der absoluten Konfiguration von Molekülen ohne spezielle Reagenzien oder chirale Trennsäulen. Sie beruht auf der unterschiedlichen Absorption von links- und rechts-zirkular polarisiertem Licht im infraroten Spektralbereich. VCD-Signale sind jedoch in der Regel um vier bis sechs Größenordnungen schwächer als klassische Absorptionssignale und erfordern lange Aufnahmezeiten, um ein akzeptables Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erreichen. Durch die Nutzung der hohen Brillanz eines Quantenkaskadenlasers

der Empfindlichkeit gegenüber dem molaren und dem Enantiomerenüberschuss (EE) bei der Zeitauflösung bewertet, die für das chirale Monitoring in chemischen Prozessen relevant ist. Die anschließende chemometrische Auswertung mittels PLS ergab eine kreuzvalidierte Vorhersagegenauigkeit von 2,8 % EE und eine robuste Vorhersage auch für den Testdatensatz (Fehler = 3,5 % EE). Ein entscheidender Vorteil der EC-QCL ist ihre breite Abstimmbarkeit bei gleichzeitiger präziser Auswahl einzelner Wellenzahlen für die Messungen. Diese Eigenschaft bietet nicht nur eine außergewöhnliche Flexibilität, sondern ermöglicht auch deutlich schnellere VCD-Messungen im Vergleich zu herkömmlichem FT-IR-VCD. Diese Fähigkeit hat sich bei der Aufklärung der Sekundärstruktur von Proteinen bewährt und ermöglicht den Nachweis bei Konzentrationen von nur 10 mg/mL in

von DFB-Lasern mit diskreten Wellenlängen bieten eine transformative Lösung, um diese Einschränkungen zu überwinden. Der höhere Durchsatz und die Möglichkeit, sich nur auf die aussagekräftigsten Wellenlängen zu konzentrieren, werden nur zusammen mit innovativen spektroskopischen Designs eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit ermöglichen, was zu deutlich kürzeren Messzeiten in gezielten Anwendungen führt. Basierend auf der QCL-Technologie lässt sich die Messzeit zur Gewinnung hochwertiger VCD-Spektren von Stunden auf wenige Minuten reduzieren. Dies wird höchstwahrscheinlich die Anwendbarkeit von VCD über die Grundlagenforschung hinaus erweitern und den Weg für das Online-Monitoring chiraler Reaktionen ebnen. QCL-VCD hat das Potenzial, sich bei der Echtzeit-Bestimmung des EE hervorzutun und die Bedeutung der zeitaufwändigen chiralen Offline-Chromatographie für die Prozessüberwachung und -steuerung zu verringern. Dies wird Abfall und Zykluszeiten reduzieren und somit zu nachhaltigen Prozessen beitragen. Darüber hinaus sehen wir ein großes Potenzial in der Verwendung von EC-QCL-VCD für die Untersuchung von Proteinaktivität und Proteinstrukturänderungen in biotechnologischen Prozessen.



**Abb. 6:** Vereinfachtes Schema des Instruments für die ausgewogenen VCD-Messungen unter Verwendung eines EC-QCL als Lichtquelle (unten). Konventioneller und ausgeglichener VCD-Spektralrauschpegel (oben links) und VCD-Spektren von (S)-(-)- und (R)-(+)-1,1'-bi-2-Naphthol (oben rechts) aus ref. [30] CC-BY 4.0

mit externem Resonator (External Resonator Quantum Cascade Laser, EC-QCL) in Kombination mit einer verbesserten Stabilisierung durch ein Zwei-Detektor-balanciertes Detektionsschema, siehe Abb. 6, werden ähnliche Rauschwerte erreicht wie bei der klassischen Absorption. Im Vergleich zu modernen FT-IR-VCD werden ähnliche Rauschwerte bei deutlich kürzeren Aufnahmezeiten erreicht.<sup>[30]</sup>

Dieser Fortschritt ermöglichte erste Studien an kleinen Molekülen und Proteinen.<sup>[13,31]</sup> Kürzlich wurde EC-QCL-VCD mit einer Aufnahmezeit von 146 s für das Echtzeitmonitoring des Enantiomerenüberschusses (EE) des Enantiomerenpaares R/S-1,1'-bi-2-Naphthol in Lösung demonstriert. Verschiedene Mischungen der beiden Komponenten wurden verwendet, um einen Razemisierungsprozess zu simulieren. Die Spektraldaten wurden mit einer Zeitauflösung von 6 min über drei Konzentrationsstufen hinweg erfasst. QCL-VCD wurde hinsichtlich

D<sub>2</sub>O innerhalb von 5 min durch Beschränkung der Emission auf die Amid-I'-Bande. Diese verbesserte Zeitauflösung erleichtert das Echtzeitmonitoring der Proteindynamik mittels VCD.<sup>[13]</sup>

Eine große Herausforderung bei der Realisierung hochempfindlichen EC-QCL-VCD mit hoher Zeitauflösung ist die Minimierung der linearen Doppelbrechung, die aufgrund von Änderungen des Polarisationszustands zu Basislinienartefakten führt. Diese Artefakte entstehen in erster Linie durch optische Unzulänglichkeiten, wie z.B. Dehnungen in Linsen und Fenstern. Um diese Effekte abzuschwächen, sind hoch optimierte optische Systeme und fortschrittliche Multimodulationstechniken, wie z.B. die duale Polarisationsmodulation, erforderlich.<sup>[32]</sup>

Während VCD wertvolle Einblicke in ein breites Spektrum von Analyten liefert, wurde ihre Verwendung durch die Herausforderungen an FT-IR-VCD begrenzt. Moderne QCL-Technologien wie breit abstimbare EC-QCL oder Arrays

## Expertenmeinung

Die neuen Prozesstechnologien, die zur Schließung der angestrebten Kreislaufströme benötigt werden, erfordern neue PAT-Lösungen für neue Messaufgaben. Einige werden neue Wege für Unternehmen bedeuten, andere werden neue Messaufgaben unter Verwendung bestehender PAT definieren – wieder andere werden zu ungelösten PAT-Aufgaben führen, die es zu bewältigen gilt. Zu den letzteren zählt der erste Schritt des Kunststoffrecyclings, die Materialerkennung, als eine Voraussetzung für die folgende Sortierung. Techniken wie die Schwingungsspektroskopie bieten die gewünschte hohe Spezifität und Geschwindigkeit. Die Zukunft der PAT steht auch vor großen Herausforderungen, wenn es darum geht, die Kreislaufwirtschaft in Wasser- und Abwasserbehandlungen zu ermöglichen, bei denen der Nachweis von Bestandteilen im Spurenbereich entscheidend ist. Diese Messaufgaben erfordern Nachweismöglichkeiten im ppb-Bereich und Spezifität auf molekularer Ebene. Da den meisten Online-Methoden entweder die erforderliche Empfindlichkeit oder Spezifität fehlt, werden chromatographische Online-Methoden und Online-Probenanreicherungstechniken wie SPE-IC-DC zunehmend an Bedeutung gewinnen, um diese PAT-Herausforderungen zu meistern. Darüber hinaus werden die regulatorischen Anforderungen die Entwicklung zukünftiger PAT-Aufgaben weiterhin prägen und den Bedarf an hochpräzisen und zuverlässigen Messtechnologien unterstreichen. Für pharmazeutische Prozesse sind anspruchsvolle Methoden wie EC-QCL-VCD zur Unterscheidung von Enantiomeren vielversprechende Fortschritte. Die hohe Variabilität der

Zusammensetzung von biobasierten Rohstoffen und Substratströmen aus dem Recycling hat schwerwiegende Auswirkungen auf die nachgelagerte Verarbeitung und kann dazu führen, dass bestimmte nachgelagerte Prozesse auf industrieller Ebene kaum durchführbar sind, es sei denn, PAT überwacht diese Variabilität und hilft dabei, sie zu verringern. In diesem Zusammenhang dient PAT nicht nur als Optimierungswerkzeug, sondern wird zu einem strategischen Pfeiler beim Aufbau belastbarer, zukunftsfähiger Produktionssysteme, die sowohl wirtschaftlich tragfähig als auch umweltverträglich sind. Da sich die Empfindlichkeit und vor allem der Durchsatz der neuen Sensortechniken weiter verbessern, werden Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) immer häufiger eingesetzt, um Rohspektren und -daten in chemische Informationen umzuwandeln. Moderne Deep-Learning-Ansätze, z.B. Convolutional Neural Networks, bieten einen vielversprechenden Weg, um die Möglichkeiten der multivariaten Kalibrierung zu erweitern. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass ein Modell nur so gut ist wie die zum Training verwendeten Daten. Wenn die künstlich angereicherten Trainingsdaten grundlegende physikalische Gesetze ignorieren oder ihnen widersprechen, gilt dies auch für das darauf aufbauende Modell. Daher wird chemisches und spektroskopisches Fachwissen – heute oft als Domänenwissen bezeichnet – für eine genaue quantitative Analyse grundlegend bleiben, auch wenn die Automatisierung mit Hilfe von Large Language Models (LLM) die zugrundeliegende Komplexität zunehmend verbirgt und die Erstellung chemometrischer Modelle für nicht fachkundige Benutzer erleichtert. Unterstützt wird dies durch die einfache, sofort verfügbare Kombination von LLM und Python. Fachkundige Anwendungen wurden in der petrochemischen und der Milchindustrie demonstriert, wo das Ausgangsmaterial der Rohstoffe variiert und die automatisierte Generierung von Modellen ein großer Fortschritt ist.<sup>[33-35]</sup> Da die Industrien die Digitalisierung und Automatisierung weiter vorantreiben, bleibt PAT ein wichtiger Wegbereiter für eine nachhaltige, qualitativ hochwertige Bioprocessing. Sensoren haben sich als

## 20. AK PAT Herbstkolloquium Prozessanalytik

### AT transformiert

Wie hilft uns PAT die Transformation zu gestalten? Das 20. AK PAT Kolloquium steht im Zeichen von Transformation und künstlicher Intelligenz. Wie transformiert PAT die Zukunft und wie transformiert die Zukunft PAT. Wie begleitet und steuert PAT die Grüne Transformation? Welchen Impact hat AI auf die PAT? Wie erlebt Biotechnologie die PAT?

Im Anschluss an unser Festkolloquium zum 20-jährigen Bestehen des AK PAT präsentieren und diskutieren wir dieses Jahr bei der Dechema in Frankfurt.

**Termin:** 3. – 5. Dezember 2025

**Ort:** Dechema-Haus, Frankfurt/Main

**Kontakt:** <https://arbeitskreis-prozessanalytik.de>

kostengünstige, schnell erfassende Werkzeuge etabliert, während ihre Kombination zu Schwärmen noch nicht ausgenutzt wird. Es bleibt von größter Bedeutung, dass der Wissenstransfer über Sektoren und Branchen hinweg gefördert wird. Durch die branchenübergreifende Integration von PAT haben die Hersteller nicht nur die Prozesseffizienz verbessert, sondern auch einen Beitrag zu den UN-Zielen für nachhaltige Entwicklung (sustainable development goals, SDGs) geleistet, insbesondere zu verantwortungsvollem Konsum und verantwortungsvoller Produktion (SDG 12) und Klimaschutz (SDG 13). Eines der Schlüsselthemen für den Erfolg bleibt die Begleitung der neuen Prozesse von der Laborphase über die Pilotierung bis hin zu großtechnischen Produktionseinheiten mit PAT.<sup>[36]</sup> Ihre breite Einführung wird für das Erreichen der dualistischen Ziele der industriellen Wettbewerbsfähigkeit und der Gesundheit des Planeten entscheidend sein.

Die Autoren widmen diesen Trend-Artikel dem Arbeitskreis Prozessanalytik (AK PAT) der Fachgruppe Analytische Chemie der Gesellschaft Deutscher

Chemiker (GDCh) anlässlich seines 20-jährigen Bestehens.

Die englischsprachige Version dieses Artikels wurde unter Creative Commons CC BY veröffentlicht. Eifert T., Gerlach M., Dahlmann K., Lendl B., Rädle M., Jaeger M. Becoming fully circular facilitated by PAT. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00216-025-05977-y>

MJ dankt der Hochschule Niederrhein für finanzielle Unterstützung bei den Publikationskosten durch ihren Open Access Publication Fund.

Die Autoren erklären, dass sie keine konkurrierenden Interessen haben.

**Dr. Tobias Eifert,**

Covestro, Uerdingen, AK PAT, GDCh

**Dr. Martin Gerlach, Bayer,**

Dormagen, AK PAT, GDCh

**Dr. Katharina Dahlmann,**

Hamilton, Domat/Ems, Schweiz, AK PAT, GDCh

**Prof. Dr. Bernhard Lendl,**

TU Wien, Österreich, AK PAT, GÖCH/GDCh

**Prof. Dr. Matthias Rädle,**

TH Mannheim, Mannheim, AK PAT, GDCh

**Prof. Dr. Martin Jaeger,**

HS Niederrhein, Krefeld, AK PAT, GDCh

Quellenangaben finden Sie online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-025-05977-y>

Wiley Online Library



### AK PAT, GDCh

Prof. Dr. Martin Jaeger, HS Niederrhein

Tel.: +49 2151 8224 - 188

[martin.jaeger@hs-niederrhein.de](mailto:martin.jaeger@hs-niederrhein.de)

ORCID:

Martin Jaeger: 0000-0002-7709-2869

Bernhard Lendl: 0000-0003-3838-5842

## Handleuchte für Zone 0

R. Stahl hat die Handleuchten-Serie 6141 um drei Modelle ergänzt. Die LED-Handleuchte 6141/12-2S ist nun ATEX- und IECEx-zertifiziert für Zone 0/21. Sie bietet bis zu 150 m Leuchtweite, 120 lm Lichtstrom und eine Betriebsdauer von bis zu 15 Stunden. Das Licht ist neutralweiß (5.000 K). Der gummierte Leuchtenkopf, IP68-Schutz und das SNAP-IN-System ermöglichen flexible Helm- und Gürtelmontage. Die überarbeitete 6141/61-1S ist mit 85 g und 142 mm Länge besonders kompakt. Sie liefert 30 lm für bis zu 10 Stunden und ist für Zone 1/2 zugelassen. Der robuste Aufbau mit gummiertem Kopf und

IP68-Schutz eignet sich für mobile Einsätze mit begrenztem Platzangebot. Mit der 6141/64-1S stellt der Anbieter erstmals eine Kopfleuchte für



Zone 1 vor. Sie ist für elektrische Umgebungen konzipiert und besteht aus nicht leitfähigem Kunststoff. Die Leuchte bietet 120 lm Lichtstrom, bis zu 150 m Leuchtweite und bis zu 12 Stunden konstante Helligkeit. Der neigbare Leuchtenkopf und die Einhandbedienung erleichtern die Anwendung. Im Lieferumfang sind Gummi- und Neoprenband enthalten. Die neuen Modelle sind für Wartungs-, Inspektions- und Installationsarbeiten in explosionsgefährdeten Bereichen ausgelegt. Sie erfüllen aktuelle Anforderungen an Sicherheit, Ergonomie und technische Präzision.

[www.r-stahl.com](http://www.r-stahl.com)

# Von Abfall zu wertvollem Kompost

## Messtechnik für die Abfallbehandlung

Das Unternehmen Advanced Composting Technologies (A.C.T.) aus Heppenheim beschreitet durch fortschrittliche Techniken zur Kompostierung, Stabilisierung von Siedlungsabfällen und Klärschlammbehandlung neue Wege in der Abfallwirtschaft. Mit einem innovativen System aus Druckluftbelüftung und halbdurchlässiger Membran bietet die Firma A.C.T. effiziente, kostengünstige, umweltfreundliche und damit „saubere“ Lösungen für die organische Abfallbehandlung.

„Das Herzstück der A.C.T.-Technologie ist die Fähigkeit, konstant hohe Temperaturen zu erzeugen, die für eine zuverlässige Hygienisierung erforderlich sind“, erläutert Florian Volk, Geschäftsführer der A.C.T.. Mikroorganismen, die in organischen Abfällen allgegenwärtig sind, erzeugen diese Hitze, solange ausreichend Sauerstoff und Feuchtigkeit vorhanden sind. Das Unternehmen führt den Prozess so, dass diese Bedingungen optimal erfüllt werden. Hohe Temperaturen in der Abfallbehandlung trocknen das Materialgemisch, erleichtern somit die Sortierung und senken gewichtsabhängige Kosten bei der Deponierung. Die Behandlung von Klärschlamm mit A.C.T.-Systemen ist besonders effektiv, da die hohen Temperaturen eine zuverlässige Hygienisierung gewährleisten. Abhängig von den Schwermetallgehalten kann der aufbereitete Klärschlamm als hochwertiger Dünger genutzt werden.

### Messtechnische Komplettlösung

Das Kerngeschäft bezieht sich allerdings auf die Kompostierung. Ein zentrales Merkmal der Technologie ist die Druckluftbelüftung, die anaerobe Zonen verhindert und die Bildung von Methan sowie Ammoniak im Prozess abwendet. Die halbdurchlässige Membran lässt Luft langsam entweichen. Trifft feuchte Luft auf diese Membran, entsteht ein Wasserfilm, der schädliche Emissionen bindet. Die Temperaturen von bis zu 85°C beschleunigen den biologischen Abbau und erhöhen die Effizienz und Kapazität der Anlagen. „Hierfür hat Jumo als führender System- und Lösungsanbieter eine durchgängige Lösung angeboten. Angefangen bei der Sensorik, über Temperaturüberwachung, bis zur Steuerung und Datenechtzeitverarbeitung“, sagt Christopher Berndt, Vertriebsrepräsentant bei Jumo.

### Prozess der Kompostierung

Der Kompostierungsprozess beginnt mit der Sammlung des organischen Materials, welches anschließend mechanisch aufbereitet wird. Das heißt, die korrekte Korngröße wird



#### Keywords

- Abfallwirtschaft
- Klärschlamm
- Temperaturmessung

eingestellt, parallel können Störstoffe ausgeschleust werden. Das aufbereitete Material wird in Rottekörpern aufgesetzt und mit oben beschriebener Membran abgedeckt. Über ein Belüftungssystem wird Luft in den Rottekörper gepresst, wodurch optimale Bedingungen für die hitzeschaffenden Mikroorganismen entstehen. Während der ersten Intensivrotte werden Temperaturen von bis zu 85°C erreicht, gefolgt von einer zweiten Intensivrotte mit Temperaturen von bis zu 75°C. Diese hohen Temperaturen zerstören pathogene Keime und Samen. Nach den Intensivrotten folgt optional ein Reifeprozess, um den höchsten Kompost-Qualitätsstandard zu erreichen. „Der Kunde bestimmt über die Rottedauer und somit welche Qualität an Kompost entsteht. Frisch- oder Fertigkompost können in sehr kurzer Zeit hergestellt werden“, so Volk weiter.

### Flexibilität und Effizienz

Die Anlagen sind modular aufgebaut und lassen sich flexibel an die geforderte Kapazität anpassen. Dank eines kleinen Maschinenparks sind die Betriebskosten und Wartungskosten niedrig. „Die Jumo-Software zur Anlagensteuerung ermöglicht eine einfache Überwachung und Verwaltung der Prozesse, wodurch der Personalbedarf ebenfalls minimiert wird“, führt Berndt aus. Das System eignet sich auch für die Stabilisierung gemischter Siedlungsabfälle. Diese Abfälle, oft nicht getrennt gesammelt, enthalten einen hohen Anteil an Organik. Dies kann im Kompostierungsprozess verwertet werden. Der resultierende, biologisch stabilisierte Output kann, je nach regionalen Vorschriften, als CLO (compost-like output) genutzt oder sicher deponiert werden, wobei die Umweltbelastung erheblich reduziert wird.



Florian Volk präsentiert die mobile Demonstrationsanlage mit verbauter Jumo-Steuerung.



Thermometer mit Funk:  
WTrans misst die Temperatur exakt.

Wiley Online Library



JUMO GmbH & Co. KG, Fulda  
Tel.: +49 661 6003-0  
mail@jumo.net · www.jumo.net

DEUTSCHE

FACHPRESSE

**WIR  
SIND  
FACH-  
MEDIEN**

**WEIL  
WISSEN  
ERFOLGREICH  
MACHT**

# WIR BEWEGEN MÄRKTE.

Fachmedien sind für Wirtschaft und Wissenschaft unentbehrlich. Sie sind es, die Informationen auf den Punkt genau liefern, Qualität garantieren, Know-how strukturieren und damit Austausch und Wertschöpfung in den Märkten intensivieren. Der Wissensstandort Deutschland braucht starke Fachmedien.

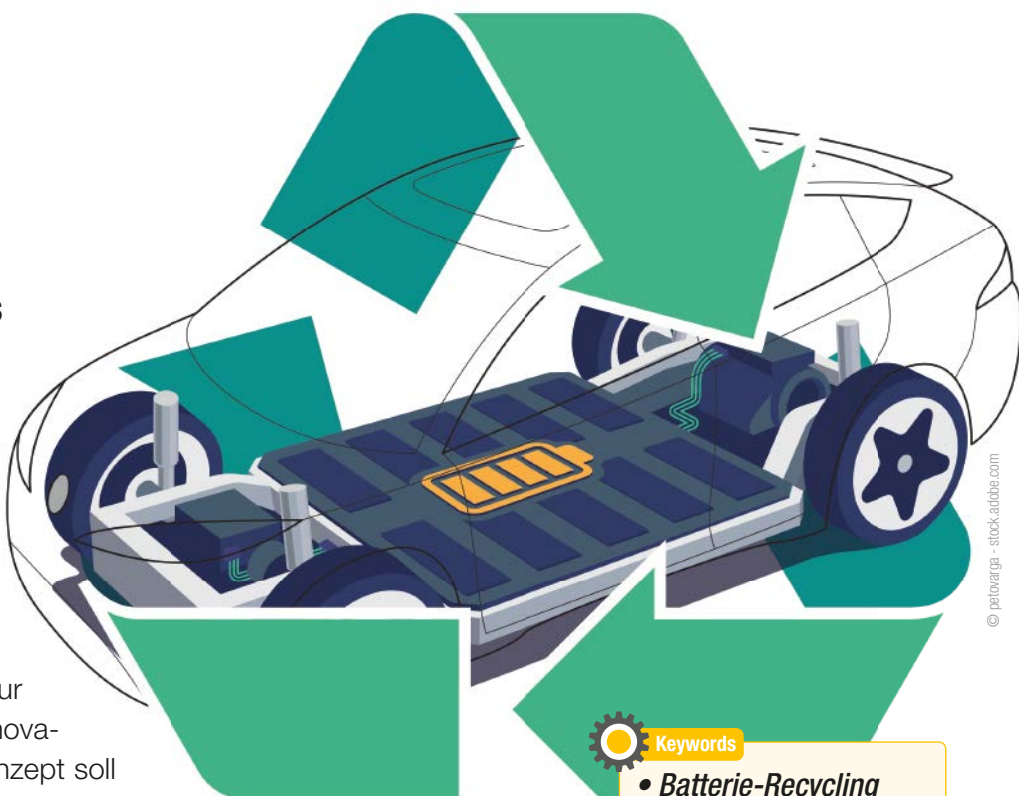


[wir-sind-fachmedien.de](http://wir-sind-fachmedien.de)

# Gut für den Kreislauf

## Künftige Technologien für das Batterie-Recycling

Forscher der RWTH Aachen arbeiten an einer vollautomatisierten Anlage zur Batterie-Demontage, die E-Auto-Akkus bis zur Modul-Ebene effizient zerlegt. Ab Oktober 2025 startet ein Projekt zur gezielten Reparatur einzelner defekter Zellen. Das innovative „Design for Dismantling“-Konzept soll bereits bei der Konstruktion das spätere Recycling berücksichtigen und wertvolle Materialien wie Nickel und Kobalt zurückgewinnen.



### Keywords

- Batterie-Recycling
- Demontage
- Design for Dismantling

Mit dem Hochlauf der Elektromobilität wächst die Zahl neu produzierter Batterien – und damit zwangsläufig auch die Menge ausgedienter Systeme. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Das wirft die Frage auf den Plan, wie Batterien

sich am Ende ihres Lebenszyklus auf sichere und effiziente Weise zerlegen, reparieren und in den Kreislauf zurückführen lassen. Politische Leitplanken wie die EU-Batterieverordnung unterstreichen diesen Anspruch. Doch hat sich eine Recycling-Industrie noch gar nicht etabliert. Und jetzt?

### Für eine vollautomatisierte Batteriezerlegung

Der erste und entscheidende Schritt für jegliche Recyclingprozesse ist die Demontage. Nur, wenn Batteriepacks bis auf die Modulebene zerlegt werden, lassen sich wertvolle Materialien sortenrein zurückgewinnen und in den anschließenden Prozessschritten gezielt weiterverarbeiten. Eine direkte Pack-Zerkleinerung würde zu einer Vermischung der Stoffe führen und die Qualität der Fraktionen erheblich verschlechtern. Gleichzeitig ist die Demontage mit spezifischen Risiken verbunden: Hochvoltbatterien können bei unsachgemäßer Handhabung schwere Verletzungen verursachen, beschädigte Zellen bergen Brandgefahr durch ein thermisches Durchgehen, und auslaufende Elektrolyte können toxische oder ätzende Stoffe freisetzen. Hinzu kommen mechanische Risiken für Personal und Anlagen – durch das Gewicht und die komplexe Bauweise der Systeme. Eine strukturierte, sichere und im besten Fall automatisierte Demontage ist daher für die Zukunft unverzichtbar.

Am Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen wird deshalb an einer vollautomatisierten Demontage-Anlage geforscht, die unterschiedliche Batteriesystem-Typen effizient und kontrolliert bis auf die Modulebene zerlegen kann. Grundlage bildet eine digitale Produkt- und Prozessdatenbank, mit deren Hilfe sich Demontagestrategien an verschiedene Batterie-Architekturen anpassen lassen. Gleichzeitig fließen die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung künftiger Batteriesysteme zurück: Das Konzept eines „Design



Soll künftig deutlich weniger aufwendig sein: RWTH-Expertin Natalia Soldan mit ihrem Kollegen Timon Elliger beim derzeit noch manuellen Zerlegen einer Elektrofahrzeug-Batterie.

## CITplus-Tipp

Weiterbildung zum Thema  
Batterie-Recycling

Der RWTH-Lehrstuhl PEM veranstaltet gemeinsam mit Campus Forum und mit der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB am 21. und 22. Oktober in Münster die ersten „Battery Production Days“ (BPD). Anmeldung und Programm: <https://battery-production-days.de>

Ebenso richten die Partner gemeinsam mit dem CARL der RWTH Aachen den „RWTH Aachen Campus“-Zertifikatskurs „Chief Battery Officer“ aus – im November 2025 erstmals in englischer Sprache. Anmeldung und Programm: <https://campusforum.rwth-aachen.de>

for Dismantling“ soll bereits in der Konstruktion verankert werden, um Recyclingprozesse von Beginn an zu erleichtern.

## Projekt zum Austausch einzelner Zellen

Doch damit endet die Kreislaufwirtschaft nicht, denn: Häufig sind es nur einzelne Zellen, die zum Ausfall ganzer Module führen. Deren komplette Entsorgung ist also hochgradig unwirtschaftlich und ökologisch unhaltbar. Daher startet

das PEM-Team im Oktober 2025 in ein neues Forschungsprojekt, das an Lösungen für reparierbare Batteriesysteme arbeitet. Neue Konstruktionsprinzipien, präzise Zustandsdiagnosen und sichere Methoden für den gezielten Austausch einzelner Zellen sollen die Lebensdauer von Batteriesystemen deutlich verlängern und somit Ressourcen schonen, Kosten senken und Emissionen reduzieren. Eine ökologische und ökonomische Bewertung begleitet das Vorhaben – unter anderem mit Unterstützung der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB –, um belastbare Entscheidungsgrundlagen für den industriellen Einsatz zu schaffen.

## Weitere Forschung zur Materialverwertung

Am Ende ergibt das alles nur einen Sinn, wenn eine effiziente Wiederverwendung kritischer Materialien möglich ist. In einem weiteren Projekt gewinnt das RWTH-Team deshalb Aktivmaterialien wie Nickel, Kobalt, Mangan und Graphit sowie inaktive Komponenten wie Aluminium, Kupfer und Elektrolyte aus gebrauchten Batterien zurück, bereitet sie auf und testet sie in neuen Zellen. Im Fokus stehen dabei neben der Leistungsfähigkeit und Sicherheit der Zellen auch umfassende Lebenszyklus-Analysen und -kostenrechnungen. Ziel ist es, hohe Rezyklat-Anteile ohne Qualitätseinbußen zu erreichen und industriell umsetzbare Prozesse zu entwickeln, die den Anforderungen der EU-Batterieverordnung entsprechen.

Erst die Verknüpfung von Demontage, Reparatur und Wiederverwendung bildet tatsächlich ein geschlossenes Kreislaufkonzept, das auf der einen Seite technologische Lösungen liefert und auf der anderen neue Maßstäbe für den Umgang mit Batterien am Ende ihres Lebenszyklus setzt. Die Überzeugung des PEM-Teams: Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten werden brauchbare Perspektiven für eine industrielle Umsetzung hervorbringen, bei der Sicherheit, Ressourcenschonung und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen berücksichtigt werden. „Gut für den Kreislauf“, sozusagen.

© PEM RWTH Aachen | Patricia Cacciotti



Natalia Soldan,

Leiterin der Forschungsgruppe  
„Circular Economy & Materials“,  
Lehrstuhl PEM, RWTH Aachen

Wiley Online Library



Production Engineering of E-Mobility  
Components (PEM)

RWTH Aachen University · [www.pem.rwth-aachen.de](http://www.pem.rwth-aachen.de)

**Julabo**  
THE TEMPERATURE CONTROL COMPANY

VERWENDUNG UMWELT-  
FREUNDLICHER KÄLTEMITTEL

Als zukunftsorientierter Hersteller setzt JULABO bei allen neuen Produktentwicklungen konsequent auf natürliche und damit umweltfreundliche Kältemittel. Damit leisten wir einen aktiven Beitrag zu einer klimafreundlichen und zukunfts-sicheren Temperaturregelung weltweit.

**JULABO IC-Eintauchkühler:** Wenn es darum geht, große Wärmemengen schnell und problemlos abzuführen, sind die neuen IC-Eintauchkühler die perfekte Wahl.

**VALEGRO:** Mit den brandneuen VALEGRO-Umwälzkühlern bringt JULABO moderne, leistungsstarke Kühlgeräte mit natürlichem Kältemittel auf den Markt.

**Neue Standards bei nachhaltigen Kühlthermostaten:** Alle Geräte arbeiten mit natürlichen Kältemitteln und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.

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



## Keywords

- Batterie-Recycling
- Batterie-Rohstoffe
- Hydrometallurgie
- Messtechnik

Die schwarze Masse ist ein wichtiges Zwischenprodukt bei der Rückgewinnung von hochreinem Lithiumsalz.

# Recycling statt Rohstoffimporte

## Europas Weg zur Batteriekreislaufwirtschaft

Europa baut seine Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien schneller, als Altbatterien zurückkommen. Die Hydrometallurgie gilt dabei als Schlüsseltechnologie – doch ohne Investitionen in die Weiterverarbeitung bleibt der Kreislauf unvollständig. Was bedeutet das für Wertschöpfung, Versorgungssicherheit und den globalen Wettbewerb?

Batterierecycling gewinnt für Unternehmen zunehmend an Bedeutung – immer mehr Industrieunternehmen treiben es voran, um wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen und ihre Abhängigkeit von Importen zu verringern. Mercedes-Benz hat, nach eigenen Angaben, die erste europäische Recyclingfabrik mit integriertem mechanisch-hydrometallurgischem Verfahren eröffnet und schließt damit als weltweit erster Automobilhersteller den Wertstoffkreislauf in Eigenregie. Auch die BASF baut Kapazitäten aus und betreibt seit Kurzem in Schwarzheide eine Anlage zur Verarbeitung von sogenannter Schwarzmasse.

### Recyclingkapazitäten im Spannungsfeld

Laut Fraunhofer ISI werden die Recyclingkapazitäten in Europa den tatsächlichen Bedarf zunächst übersteigen, weil aktuell noch zu wenige Altbatterien und Produktionsabfälle verfügbar sind. Während also Anlagen entstehen, fehlt es an Material. Gleichzeitig ist klar: In den kommenden Jahren wird das Bild umschlagen, denn dann sollen deutlich mehr Batterien zur Wiederverwertung anfallen. Die Zahl an ver-

fügbaren Altbatterien zeigt etwa den Verlauf der Zahl an neuer E-Autos mit einem zeitlichen Versatz von ca. zehn Jahren.

Der heutige Kapazitätsaufbau ist daher eine Investition in die Zukunft – mit kurzfristigen Überkapazitäten, aber langfristig entscheidender Bedeutung für Wertschöpfung und Versorgungssicherheit.

Parallel dazu hat China seit dem 1. August 2025 die Spielregeln verändert: Importierte Schwarzmasse wird dort nicht länger als gefährlicher Abfall eingestuft, sondern als Produkt – sofern sie die neuen nationalen Standards erfüllt. Für Unternehmen heißt das: Anstatt Entsorgungskosten zu tragen, können sie Schwarzmasse exportieren und verkaufen. China positioniert sich damit als zentraler Player, stärkt seine Lieferketten und öffnet einen Absatzmarkt, während Europa noch mit der Auslastung seiner Anlagen ringt.

Deutschland muss daher beides schaffen: kurzfristig mit Überkapazitäten umgehen und zugleich eine Strategie entwickeln, wie das Land langfristig im globalen Wettbewerb um Rohstoffe, Technologien und Märkte bestehen

kann. Batterierecycling wird damit nicht nur zu einer Frage der Umweltpolitik, sondern auch zu einem industriepolitischen Schlüsselthema.

### Hydrometallurgie im Fokus

Das hydrometallurgische Verfahren gilt derzeit als das vielversprechendste Verfahren im Batterierecycling und setzt sich in Europa zunehmend als Standard durch. Sein größter Vorteil liegt in der hohen Selektivität: Wertvolle Metalle wie Lithium, Nickel, Kobalt und Mangan können gezielt aus der sogenannten Schwarzmasse herausgelöst und in hoher Reinheit zurückgewonnen werden. Im Gegensatz zur Pyrometallurgie, bei der Materialien bei über 1.500 °C eingeschmolzen werden, arbeitet die Hydrometallurgie, wie der Name bereits andeutet in wässriger Umgebung. Dadurch werden deutlich niedrigere Temperaturen und weniger Energie benötigt. Zudem gehen hier keine wichtigen Bestandteile wie Elektrolyte oder Graphit verloren, die bei der Verbrennung in der Pyrometallurgie in Emissionen umgewandelt werden.

Allerdings bringt die Hydrometallurgie auch Herausforderungen mit sich. Sie erfordert eine

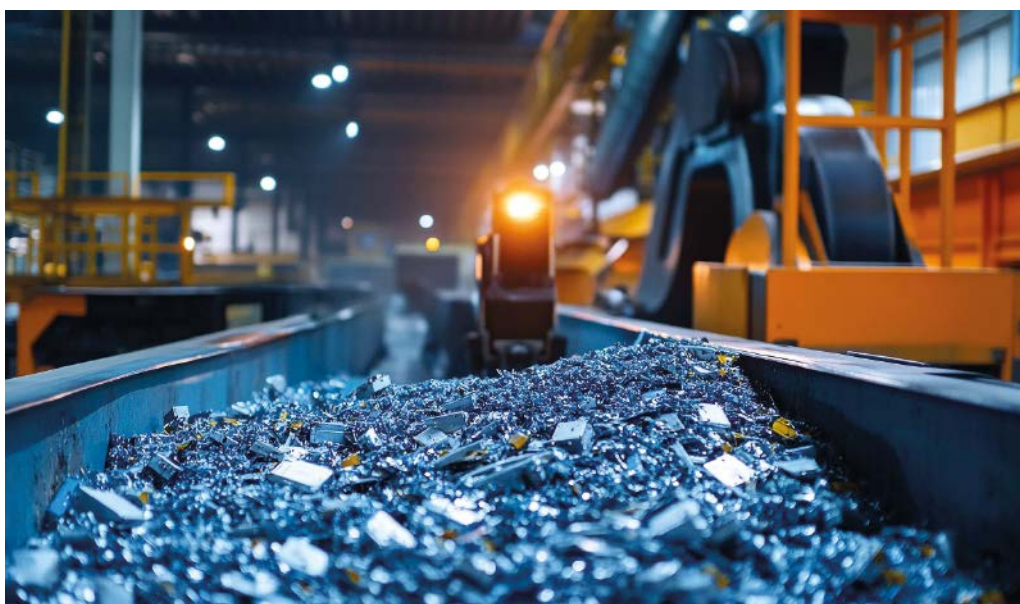
Vielzahl chemischer Prozessschritte, von der Laugung über die Fällung bis hin zur Lösungsmittel-Extraktion. Aggressive Säuren und Reagenzien müssen präzise dosiert werden, um stabile Reaktionen zu gewährleisten. Kleinste Abweichungen in pH-Wert, Temperatur oder Durchfluss können die Ausbeute verringern oder die Qualität der zurückgewonnenen Rohstoffe beeinträchtigen. Damit ist die Hydrometallurgie zwar ressourcenschonender, aber auch komplexer in der Steuerung – und deshalb stark abhängig von zuverlässiger Messtechnik.

Gerade an dieser Stelle zeigt sich die Relevanz moderner Sensorik: Inline-pH-Sonden sichern eine konstante chemische Umgebung in der Laugung, Durchflussmesser steuern präzise die Zufuhr von Chemikalien und Temperaturfühler gewährleisten stabile Reaktionsbedingungen. Nur wenn diese Parameter exakt erfasst und geregelt werden, lassen sich hohe Reinheitsgrade erzielen und gleichzeitig Chemikalien, Energie und Wasser effizient einsetzen. Darüber hinaus ist eine kontinuierliche Datenaufzeichnung notwendig, um regulatorische Anforderungen wie die EU-Batterieverordnung zu erfüllen und die Rückverfolgbarkeit der Materialströme zu gewährleisten.

Der Messtechnikspezialist Endress+Hauser unterstützt Unternehmen bereits heute bei genau diesen Aufgaben: mit robusten, prozesssicheren Messlösungen, die auch in aggressiven Medien zuverlässig arbeiten, und mit digitalen Schnittstellen, die Daten in Echtzeit verfügbar machen. Damit tragen die Systeme dazu bei, komplexe hydrometallurgische Prozesse stabil zu fahren und gleichzeitig Ressourcen zu schonen.

### Den Kreislauf schließen – vom Recycling zum Refining

So weitreichend die Fortschritte beim Recycling auch sind: Ein vollständiger Kreislauf entsteht erst dann, wenn die zurückgewonnenen Roh-



Der erste Schritt im industriellen Batterierecycling zur Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe ist die Demontage und das Schreddern.

stoffe wieder in neue Batterien einfließen. Genau hier liegt aktuell die größte Lücke in Europa. Während die Rückgewinnung von Metallen wie Lithium, Nickel oder Kobalt zunehmend industriell etabliert wird, fehlen bislang die großtechnischen Anlagen, die diese Materialien erneut in Aktivmaterialien für Batteriezellen verarbeiten. Ein Großteil dieses sogenannten „Refinings“ findet nach wie vor in Asien statt, vor allem in China, wo viele internationale Unternehmen eigene Kapazitäten aufgebaut haben.

In Deutschland selbst ist die Investitionsbereitschaft bislang gering. Komplette Anlagen für die Wiederverwertung von Rohstoffen zu neuen Batteriematerialien entstehen hier kaum – auch weil hohe Investitionskosten, komplexe Genehmigungsverfahren und lange Amortisationszeiten abschrecken. Erste Ansätze kommen

von lokalen Start-ups, während größere Unternehmen ihre europäischen Standorte häufig in Nachbarländern wie Polen oder Ungarn aufbauen. Damit entwickelt sich zwar ein gesamteuropäisches System, doch die Frage bleibt, ob es gelingt, die derzeitige Durststrecke zu überbrücken.

Trotz dieser Unsicherheiten ist klar: Europa ist auf einem guten Weg, die eigene Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu verringern und den Wertstoffkreislauf Schritt für Schritt zu schließen. Entscheidend wird sein, nicht nur Recyclingprozesse weiter zu optimieren, sondern auch in die nächste Stufe der Wertschöpfung zu investieren – in Anlagen, die die zurückgewonnenen Rohstoffe wieder in hochwertige Batteriematerialien verwandeln. Erst dann wird aus dem linearen Modell ein echter Kreislauf.

### Die Wiederaufbereitung von Batteriezellen verläuft unter strengen Sicherheitsstandards.



**Dr. Dustin Kubas,**  
Product Manager Sales  
Marketing, Endress+Hauser  
Deutschland

Wiley Online Library



Endress+Hauser Deutschland GmbH  
Tel.: +49 7621 - 97501  
info.de@endress.com · www.endress.com



Der Betriebsingenieur ist Garant für reibungslose Arbeitsabläufe in seinem Betrieb und damit für die chemische Industrie von großer Bedeutung. Er trägt die Verantwortung für Instandhaltung und Verfügbarkeit seiner Anlage sowie für die Prozess- und Anlagensicherheit. An dieser Stelle beschreiben wir in lockerer Folge Aufgaben und Themenschwerpunkte im betrieblichen Alltag und berichten über die regelmäßigen Treffen der Regionalgruppen der Informationsplattform für Betriebsingenieure der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC).



#### Keywords

- *EU-Maschinenverordnung*
- *Cybersicherheit*
- *Künstliche Intelligenz*

# Neue EU-Maschinenverordnung: Von der Richtlinie zur Verordnung

## Die Transformation der Maschinensicherheit im Zeitalter von KI und Digitalisierung



© DOC RABE Media - stock.adobe.com

Der Erfahrungsaustausch der Betriebsingenieure (Regionalgruppe Rhein-Ruhr) des VDI-CVC am 25. April 2025 stand ganz im Zeichen der neuen EU-Maschinenverordnung (EU) 2023/1230, die ab dem 20. Januar 2027 die bisherige Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ablösen wird. In drei aufschlussreichen Vorträgen von Max Teller-Weyers, TÜV Industry Service, Christoph Kirchner, Covestro Deutschland, und Christian Aumann, IBF-solutions, wurden die weitreichenden Änderungen und deren Auswirkungen auf Hersteller und Betreiber von Maschinen beleuchtet. Besonders die Integration von künstlicher Intelligenz, Cybersicherheit und die Digitalisierung von Dokumentationen standen im Fokus der Diskussionen.

Die Umwandlung der Maschinenrichtlinie in eine Verordnung markiert einen bedeutenden rechtlichen Paradigmenwechsel. Anders als die bisherige Richtlinie, die erst durch nationale Gesetzgebung umgesetzt werden musste, gilt die neue Verordnung unmittelbar in allen EU-Mitgliedstaaten. Dies schafft ein einheitliches Regelwerk ohne nationale Interpretationsspielräume und sorgt für mehr Rechtssicherheit und Transparenz im europäischen Binnenmarkt.

Der Weg zur neuen Maschinenverordnung war lang: Nach der Veröffentlichung eines ersten Entwurfs im April 2021 folgten intensive Positionierungen der Branchenverbände und Trilog-Verhandlungen zwischen EU-Parlament, Rat und Kommission. Nach der politischen Einigung im Dezember 2022 und der Genehmigung durch EU-Parlament und Rat im Frühjahr 2023 wurde

die Verordnung schließlich am 29. Juni 2023 im Europäischen Amtsblatt veröffentlicht und trat am 19. Juli 2023 in Kraft. Die Übergangsfrist endet am 20. Januar 2027, ab diesem Zeitpunkt müssen alle neu in Verkehr gebrachten Maschinen den Anforderungen der Verordnung entsprechen.

### Künstliche Intelligenz in Maschinen

Eine der bedeutendsten Neuerungen der Maschinenverordnung ist die explizite Berücksichtigung von künstlicher Intelligenz (KI) in Maschinen. Die Verordnung zielt auf die sichere Integration von KI-Systemen ab und ergänzt damit den parallel entwickelten AI-Act, der am 12. Juli 2024 im EU-Amtsblatt veröffentlicht wurde.

Besonders hervorzuheben sind die neuen Bestimmungen für Sicherheitsbauteile mit voll-

ständig oder teilweise selbstentwickelndem Verhalten sowie für Maschinen mit eingebetteten KI-Systemen. Diese werden in Anhang I Teil A der Verordnung als „Hochrisiko“-Maschinen klassifiziert und unterliegen einer obligatorischen Fremdbewertung durch notifizierte Stellen. Die Verordnung stellt spezifische Anforderungen an KI-gesteuerte Maschinen:

- Sie dürfen keine Handlungen ausführen, die über ihre festgelegte Aufgabe und ihren Bewegungsbereich hinausgehen.
- Die Aufzeichnung von Daten über sicherheitsrelevante Entscheidungsprozesse muss aktiviert sein und diese Daten müssen für ein Jahr gespeichert werden.
- Es muss jederzeit möglich sein, die Maschine zu korrigieren, um ihre inhärente Sicherheit zu wahren.

Die Risikobeurteilung und Risikominderung müssen zudem Gefährdungen umfassen, die sich aus der bestimmungsgemäßen Veränderung des selbstentwickelnden Verhaltens oder der selbstentwickelnden Logik ergeben können.

### Cybersicherheit:

#### Schutz vor böswilligen Dritten

In einer zunehmend vernetzten Industriewelt gewinnt die Cybersicherheit an Bedeutung. Die neue Maschinenverordnung trägt diesem Umstand Rechnung und integriert Bestimmungen zum Schutz vor böswilligen Dritten. Sie steht damit im Einklang mit der Verordnung 2019/881, dem Rechtsakt zur Cybersicherheit.

Konkret fordert die Verordnung, dass Software und Daten, die für die Konformität von entscheidender Bedeutung sind, als solche zu benennen und angemessen gegen unbeabsichtigte oder vorsätzliche Korruption zu schützen sind. Steuerungen müssen so ausgelegt und beschaffen sein, dass sie vernünftigerweise vorhersehbaren böswilligen Versuchen Dritter, die zu einer Gefährdungssituation führen könnten, standhalten können. Diese Anforderungen stellen Hersteller vor neue Herausforderungen, da sie nun auch die IT-Sicherheit ihrer Produkte gewährleisten müssen. Gleichzeitig bieten sie Betreibern mehr Sicherheit im Hinblick auf potenzielle Cyberangriffe auf ihre Maschinen und Anlagen.

#### Autonome und ferngesteuerte Maschinen

Die Maschinenverordnung trägt auch dem Trend zu autonomen und ferngesteuerten Maschinen Rechnung. Sie enthält neue und zusätzliche grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen, die speziell auf diese Maschinentypen zugeschnitten sind. Dazu gehören Anpassungen im Bereich der Ergonomie an autonomen Betrieb und sich weiterentwickelndes Verhalten, Anforderungen zum Schutz gegen Korruption bei Fernzugriff sowie spezifische Bestimmungen für Risiken durch bewegliche Teile bei der Koexistenz von Mensch und Maschine. Besonders hervorzuheben sind die Überwachungsfunktionen, die die Möglichkeit bieten, aus der Ferne Informationen von der Maschine zu erhalten, sowie neue Anforderungen für Batterien mit Automatik-Ladefunktion bei mobilen Maschinen zur Vermeidung von Berührungs- oder Kollisionsgefahren.

#### Papierdokumente werden digital

Ein weiterer wichtiger Aspekt der neuen Verordnung ist die Digitalisierung von Papierdokumenten. Betriebs- und Montageanleitungen sowie EU-Konformitäts- und Einbauerklärungen können künftig in digitaler Form bereitgestellt werden. Dabei müssen jedoch bestimmte Hauptmerkmale beachtet werden:

- Der Zugang zu den Dokumenten muss direkt an der Maschine gekennzeichnet sein, bspw. durch einen QR-Code.

- Die Dokumente müssen herunterladbar und ausdrückbar sein.
- Bei Online-Bereitstellung müssen die Dokumente mindestens 10 Jahre nach dem Inverkehrbringen verfügbar bleiben.
- Auf Verlangen des Nutzers zum Zeitpunkt des Kaufs ist eine kostenlose Papierkopie innerhalb eines Monats bereitzustellen.
- Für Maschinen mit vorhersehbarer Nutzung durch nichtprofessionelle Nutzer müssen wichtige Sicherheitsinformationen weiterhin in Papierform vorliegen.

Diese Regelungen erleichtern einerseits den Zugang zu aktuellen Dokumentationen, stellen andererseits aber sicher, dass wichtige Sicherheitsinformationen auch ohne digitale Hilfsmittel zugänglich bleiben.

#### Mehr Rechtssicherheit für Betreiber

Ein besonders relevanter Aspekt für Betreiber von Maschinen ist die erstmalige Aufnahme der „wesentlichen Veränderung“ in den Gesetzestext. Die Verordnung definiert eine „wesentliche Veränderung“ als „eine vom Hersteller nicht vorgesehene physische oder digitale Veränderung“ und regelt klar die Verantwortlichkeiten: Wer eine wesentliche Veränderung an einer Maschine vornimmt, gilt als Hersteller und unterliegt den entsprechenden Pflichten.

Ausgenommen sind nichtprofessionelle Nutzer, die eine wesentliche Veränderung an ihrer Maschine für den Eigengebrauch vornehmen. Zudem wird klargestellt, dass eine wesentliche Veränderung dann vorliegt, wenn neue signifikante Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Es besteht keine Verpflichtung, Prüfungen zu wiederholen und neue Dokumentationen für Maschinen zu erstellen, die Teil einer Gesamtheit von Maschinen und von der Veränderung nicht betroffen sind. Diese Klarstellungen erhöhen die Rechtssicherheit für Betreiber, die Änderungen an ihren Maschinen vornehmen, und helfen bei der Entscheidung, ob eine Änderung als wesentlich einzustufen ist und somit ein neues Konformitätsbewertungsverfahren erfordert.

#### Neue Rollen und Verantwortlichkeiten

Die Maschinenverordnung führt neue Wirtschaftsakteure ein und definiert deren Pflichten. Neben den bereits bekannten Rollen des Herstellers und des Bevollmächtigten werden nun auch der Einführer und der Händler explizit genannt. Der Einführer ist eine in der EU ansässige Person, die ein Produkt aus einem Drittstaat auf dem EU-Markt in Verkehr bringt. Der Händler ist eine Person in der Lieferkette, die ein Produkt auf dem Markt bereitstellt, mit Ausnahme des Herstellers oder des Einführers. Die Verordnung legt die Pflichten dieser Wirtschaftsakteure in den Artikeln 10-8 fest und regelt in Artikel 19 deren Identifizierung. Diese klare Zuweisung von Verantwortlichkeiten soll die Rückverfolgbarkeit von Produkten verbessern und die Marktüberwachung erleichtern.

### Maschinensicherheit in der Praxis

Wie Christoph Kirchner von Covestro Deutschland in seinem Vortrag „Maschinensicherheit hört nicht beim CE-Kennzeichen auf“ betonte, ist die Maschinensicherheit ein kontinuierlicher Prozess, der weit über die formale CE-Kennzeichnung hinausgeht. Besonders in der Chemie- und Pharmaindustrie, wo Covestro weltweit etwa 45.000 Maschinen betreibt, ist die Maschinensicherheit von entscheidender Bedeutung.

Kirchner präsentierte typische Mängelbeispiele aus der Praxis, darunter deaktivierte Verriegelungen, unzureichende Schutzeinrichtungen und beschädigte Schutzzäune. Diese Beispiele verdeutlichen, dass selbst CE-gemerkte Maschinen im Betrieb unsicher werden können, wenn Schutzeinrichtungen manipuliert oder nicht ordnungsgemäß gewartet werden. Bei Covestro basiert die Maschinensicherheit auf vier Säulen:

- Die Deutschland-Anweisung 124 als Grundlage für Maschinensicherheit in Deutschland
- Eine globale Maschinensicherheits-Community mit einem dreistufigen System (Global, Regional, Lokal)
- Mindestanforderungen (MSRC) als Basis für Maschinenbeschaffung und -änderungen
- Maschinensicherheits-Zertifikate zur Dokumentation des MS-Checks und getroffener Schutzmaßnahmen

Kirchner betonte die Bedeutung eines systematischen Workflows bei der Beschaffung und Änderung von Maschinen. Dieser umfasst die Erstellung eines Sicherheitskonzepts, die Festlegung von Mindestanforderungen sowie die Installation und Inbetriebnahme mit einem abschließenden Maschinensicherheits-Check.

#### Wichtige Aspekte bei der Beschaffung von Maschinen

Ein zentraler Punkt in Kirchners Vortrag waren die wichtigen Aspekte bei der Bestellung von Maschinen. Er betonte, dass die EU-Maschinenrichtlinie bzw. -verordnung nicht alle Aspekte abdeckt und daher zusätzliche Vereinbarungen mit dem Hersteller getroffen werden sollten. Vor der Angebotsanfrage sollte gut überlegt werden, wie Maschinen gekauft werden. Kirchner empfiehlt, Maschinen mit CE-Kennzeichnung zu kaufen, statt unvollständige Maschinen, und klare Zusatzvereinbarungen zu treffen. Die Kommunikation und der Informationsaustausch mit dem Hersteller vor der Angebotserstellung sind entscheidend, um Maschinensicherheitsnormen und Engineering Standards als Teil der technischen Spezifikation festzulegen. Besonders wichtig ist die Klärung der Betriebsweise: Der Hersteller muss die geplante Betriebsweise, den Aufstellort sowie die Prozess- und Umgebungsbedingungen kennen. Auch die Nutzung und mögliche Maschinengefährdungen sollten

besprochen werden. Bei Prozessmaschinen ist die Schnittstelle zu Gefährdungen aus dem Prozess und die Einbindung in die Anlagensteuerung zu beachten.

### Stichtagsregelungen und Übergangsfristen

Ein wichtiger praktischer Aspekt sind die Stichtagsregelungen für die Anwendung der neuen Maschinenverordnung. Der Stichtag 20. Januar 2027 markiert das Ende der Übergangsfrist, ab diesem Zeitpunkt müssen alle neu in Verkehr gebrachten Maschinen den Anforderungen der Verordnung entsprechen. Dies kann zu Herausforderungen führen, insbesondere bei Projekten mit langen Lieferzeiten oder bei Verzögerungen in der Inbetriebnahme, die über den Stichtag hinausgehen. Kirchner empfiehlt daher, in der technischen Spezifikation den Verantwortlichen für die Konformitätserklärung festzulegen und Bedingungen für eine mögliche Stichtagsüberschreitung zu vereinbaren.

Eine Möglichkeit ist, bereits jetzt eine doppelte Konformitätserklärung (nach Maschinenrichtlinie und Maschinenverordnung) zu vereinbaren, besonders bei Projekten mit langen Lieferzeiten. Hersteller können schon jetzt die neue Maschinenverordnung erfüllen und dies in der Konformitätserklärung nach der Maschinenrichtlinie angeben.

### Betriebsanleitung und technische Dokumentation

Kirchner empfiehlt, vor der Bestellung die (Muster)-Betriebsanleitung auf Vollständigkeit und Verständlichkeit zu prüfen und überzo-

gene Regelungen zu vermeiden. Gemäß der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die vom Maschinenhersteller mitgelieferten Informationen zutreffend sind, es sei denn, er verfügt über andere Erkenntnisse. Wenn die Betriebsanleitung Mängel aufweist, sollte eine Nachbesserung in der technischen Spezifikation vereinbart werden.

Auch das Dokumentationsmanagement ist wichtig: Der Liefertermin für die überarbeitete technische Dokumentation sollte festgelegt werden, idealerweise mit der Maschinenlieferung, wie es gesetzlich vorgeschrieben ist. Bei unvollständigen Maschinen sollte eine vollständige Betriebsanleitung vereinbart werden, obwohl gesetzlich nur eine Montageanleitung erforderlich ist.

Mit der neuen Maschinenverordnung wird auch die digitale Dokumentation möglich. Hier ist es wichtig, die Download-Option zu nutzen und die Dokumente lokal zu sichern sowie die Vollständigkeit der digitalen Dokumentation im Vergleich zur Papierdokumentation zu prüfen.

### Gefährdungsbeurteilung und Erstprüfung

Nach der Lieferung einer Maschine sind weitere Schritte erforderlich, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Kirchner betonte, dass das Vorhandensein einer CE-Kennzeichnung nicht von der Pflicht zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung entbindet. Die arbeitsmittelbezogene Gefährdungsbeurteilung nach §3 BetrSichV muss weitere relevante Gefährdungsbeurteilungen berücksichtigen, die Her-

stellervorgaben für Einbau und Betrieb gemäß Betriebsanleitung umsetzen und sicherheitsrelevante Prüf- und Wartungsvorgaben planen. Auch die sichere Integration ins Betriebsumfeld muss geprüft werden.

Bei Prozessmaschinen ist eine HAZOP (Hazard and Operability Study) erforderlich, um die Einbindung in den Prozess und die übergeordnete Steuerung sowie Prozessgefährdungen zu bewerten. Restgefährdungen gemäß Betriebsanleitung müssen bewertet und betriebliche Maßnahmen festgelegt werden.

Die Erstprüfung, die Teil der Gefährdungsbeurteilung nach BetrSichV ist, umfasst nicht nur die Funktionsprüfung, sondern auch die Sicherheitsprüfung. Ein Maschinensicherheitscheck vor der kommerziellen Erstinbetriebnahme ist wichtig, wobei ausreichende Sicherheit eine Voraussetzung für die Inbetriebnahme ist.

### Änderungen und „wesentliche Veränderungen“

Ein besonders relevanter Aspekt für Betreiber von Maschinen sind Änderungen und wesentliche Veränderungen. Mit der neuen Maschinenverordnung wird die „wesentliche Veränderung“ erstmals EU-weit geregelt, was mehr Rechtssicherheit schafft.

Bei Umbau- und Retrofit-Projekten muss geprüft werden, ob eine wesentliche Veränderung vorliegt, und die Konformitätsverantwortung muss geklärt werden. Es ist zu beachten, dass strengere Anforderungen gelten und es in der Regel nicht ausreicht, nur den geänderten Teil zu erneuern. Vielmehr müssen gegebenen-

Die Betriebsingenieure in der VDI-GVC treffen sich in Regionalgruppen mehrmals jährlich. Das nächste Jahrestreffen der BING findet am 21. November 2025 in Wiesbaden statt.

falls weitere Teile bis hin zur gesamten Maschine auf den Stand der Technik gebracht werden.

Bei der Prozessintegration ist die Kernfrage, wer die „steuerungstechnische Sicherheit“ implementiert. Es wird empfohlen, die Maschinensicherheitssteuerung separat zu halten und nicht in die übergeordnete Anlagensteuerung zu integrieren.

Auch bei Bestandsmaschinen kann Änderungsbedarf aus dem „Stand der Technik“ oder der BetrSichV entstehen, da es keinen „Bestandsschutz“ für Maschinen gibt. Die Restlebensdauer und der Verschleiß der elektrischen Ausrüstung, insbesondere der Sicherheitsfunktionen und elektromechanischen Komponenten, sollten geprüft werden.

### Software zur effizienten CE-Kennzeichnung

Im dritten Vortrag wurde die Software Safexpert der Firma IBF-solutions durch Christian Aumann vorgestellt, die Unternehmen bei der CE-Kennzeichnung und Risikobeurteilung unterstützt. Safexpert ist eine modular aufgebaute Software, die für Ein-Mann-Unternehmen, kleine und mittelständische Unternehmen sowie Großunternehmen und Konzerne geeignet ist. Die Software bietet verschiedene Module, die Unternehmen im sicherheitstechnischen Projektmanagement und im Umgang mit Normen und EU-Richtlinien unterstützen. Dazu gehören die Risikobeurteilung nach EN ISO 12100, der CE-Leitfaden für die Schritt-für-Schritt-Anleitung durch das Konformitätsverfahren und der NormManager für die Verwaltung und Aktualitätsüberwachung von Normen.

Die Software bietet auch eine zentrale Verwaltung von Projekten und einen optimalen Workflow für Projektteams. Bestehende Projekte können als Kopiervorlagen genutzt werden, und wertvolles Erfahrungswissen wird archiviert. Die Software wird kontinuierlich weiterentwickelt, um neue Features zu integrieren und die rechtliche Aktualität zu gewährleisten. Ab Version 9.1 unterstützt Safexpert auch die neue Maschinenverordnung.

### Herausforderungen und Chancen der neuen Maschinenverordnung

Die neue EU-Maschinenverordnung stellt Hersteller und Betreiber von Maschinen vor neue Herausforderungen, bietet aber auch Chancen für mehr Sicherheit und Rechtssicherheit. Die explizite Berücksichtigung von künstlicher Intelligenz, Cybersicherheit und autonomen Maschinen trägt den technologischen Entwicklungen Rechnung und schafft einen modernen Rechtsrahmen für die Maschinensicherheit.

Die Digitalisierung von Dokumentationen erleichtert den Zugang zu aktuellen Informationen, während die klare Definition der „wesentlichen Veränderung“ mehr Rechtssicherheit für Betreiber schafft. Die Einführung neuer Wirtschaftsakteure und die Festlegung ihrer Pflichten verbessern die Rückverfolgbarkeit von Produkten und erleichtern die Marktüberwachung. Für Betreiber von Maschinen bleibt es wichtig, über die formale CE-Kennzeichnung hinauszudenken und die Maschinensicherheit als kontinuierlichen Prozess zu verstehen. Die arbeitsmittelbezogene Gefährdungsbeurteilung,

die sichere Integration ins Betriebsumfeld und regelmäßige Sicherheitschecks sind entscheidend für einen sicheren Betrieb.

Die Stichtagsregelung zum 20. Januar 2027 erfordert eine vorausschauende Planung, insbesondere bei Projekten mit langen Lieferzeiten. Durch klare vertragliche Vereinbarungen und eine frühzeitige Berücksichtigung der neuen Anforderungen können Verzögerungen und zusätzliche Kosten vermieden werden.

Insgesamt bietet die neue Maschinenverordnung einen modernen und zukunftsfähigen Rechtsrahmen für die Maschinensicherheit, der den technologischen Entwicklungen Rechnung trägt und gleichzeitig ein hohes Schutzniveau für Anwender gewährleistet. Hersteller und Betreiber von Maschinen sollten sich frühzeitig mit den neuen Anforderungen vertraut machen und ihre Prozesse entsprechend anpassen.

### VDI-GVC Betriebsingenieure Rhein-Ruhr

- Maschinensicherheit hört nicht beim CE-Kennzeichen auf, Christoph Kirchner, Covestro Deutschland
- Verordnung (EU) 2023/1230 – neue Maschinenverordnung, Max Teller-Weyers, TÜV Süd
- Safexpert – Die Standardsoftware zur CE-Kennzeichnung, Christian Aumann, IBF Solution



**Christian Poppe,**  
Technical Asset Management  
Uerdingen, Covestro Deutschland,  
Vorsitzender des VDI-GVC  
Fachbereichs Betrieb verfahrens-  
technischer Anlagen

Wiley Online Library



VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik  
und Chemieingenieurwesen

Vivien Manning · Tel.: +49 211 6214-314  
manning@vdi.de · www.vdi.de/gvc

Propan-Kältemaschine  
von L&R Kältetechnik

# Kältetechnik im Klimawandel

**Zukunftssichere Kälteanlagen mit natürlichen  
Kältemitteln und innovativen Energiespartechniken**

Der Klimawandel hat schon jetzt konkrete Auswirkungen auf die Kältetechnik – für die Hersteller von Kälteanlagen und auch für deren Betreiber. Denn ein wichtiger Faktor für die Auslegung der Anlagen ist die maximale Umgebungstemperatur, die als Folge des Klimawandels weiter steigen wird. Was bedeutet das konkret aus Sicht der Anwender von Kälteanlagen? Welcher Handlungsbedarf besteht, und wie gestalten sie ihre Kälteversorgung zukunftssicher?



## Keywords

- Kältetechnik
- Kältemittel
- Förderung

Die höchste zu erwartende Umgebungstemperatur ist ein entscheidender Faktor bei der Auslegung von Industrie-Kälteanlagen und auch von Kaltwassersätzen und Rückkühlanlagen. Diese Temperatur bestimmt letztlich die Anlagenhöchstleistung. Wird sie zu niedrig angesetzt, kann die Kälteanlage in Hitzeperioden nicht ausreichend Kälte bereitstellen.

Dass dieser Faktor steigen wird, steht für die Klimaforschung außer Frage. Wie hoch die Steigerungen konkret sein werden, hängt von der realen Erderwärmung ab und damit auch von den Bemühungen um die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ein mögliches Szenario sieht so aus: Um das Jahr 2050 wird es im Südwesten Deutschlands an 80 Tagen Temperaturen von über 25°C geben. In den Jahren 1971 bis 2000 waren es im Schnitt nur 30 Tage. In Stuttgart

wird es an 70 Tagen heißer als 30°C sein, und die Spitzenwerte werden bei kaum vorstellbaren (und bislang noch nie erreichten) 45°C liegen.

## Die Auslegungstemperatur prüfen

Da die Zieltemperatur der Kälte, die eine Anlage z.B. für den Spritzgießprozess oder die Pharmaproduktion erzeugen soll, unverändert bleibt, müssen die Anlagen in Zukunft eine größere Temperaturdifferenz überbrücken und eine höhere Kälteleistung erzeugen bzw. erbringen. Der Anwender sollte somit prüfen, ob seine Anlage für das zu erwartende Temperaturniveau ausgelegt ist. Ist das nicht der Fall, kann der Temperaturbereich eventuell durch Vergrößern der Wärmetauscher oder durch Integration zusätzlicher Wärmetauscher in den Kältekreislauf erweitert werden. Ob das möglich

und mit welchem Aufwand es verbunden ist, hängt von den individuellen Gegebenheiten ab.

Aber auch wenn die Anlage selbst bei einer Außentemperatur von 45°C die gewünschte Kältemenge problemlos bereitstellen kann, gibt es Handlungsbedarf. Denn die Anlage wird in Zukunft, bei höheren Umgebungstemperaturen, mehr beansprucht. Die Folgen sind höherer Energieverbrauch und höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Außerdem werden die Energiekosten, vorsichtig ausgedrückt, perspektivisch eher steigen als fallen, und durch die CO<sub>2</sub>-Bepreisung sind weitere Kosten zu erwarten. Das sollte insbesondere bei der Projektierung neuer Anlagen berücksichtigt werden. Denn mit der höheren Leistung, die Kälteanlagen künftig erbringen müssen, steigt die Bedeutung und auch die Wirksamkeit von energiesparenden Konstruktionsmaßnahmen.

## Ziel: Höchste Effizienz in allen Temperaturlagen

Eine zukunftssichere Kältemaschine muss somit auf die zu erwartenden hohen Außentemperaturen ausgelegt und mit den entsprechenden Techniken ausgerüstet sein. Dazu gehören auch geeignete Kältemittel, d.h. Niederdruckkältemittel und natürliche Kältemittel. Allerdings treten die außergewöhnlich hohen Temperaturen, für die eine Kälteanlage ausgelegt sein muss, ja nun in extremen Wetterlagen, sprich Hitzeperioden auf. In allen anderen Temperaturbereichen muss die Anlage aber ebenfalls energieeffizient arbeiten. Das ist dann gegeben, wenn sie gut regelbar ist und ihre Leistung an die jeweilige Außentemperatur anpasst. Das wird durch bewährte Regelungs- und Energieeinsparstechniken gewährleistet:

- Ein Freikühler (Winterentlastung) erzeugt die für die Rückkühlung des Kühlwassers benötigte Kälte bei mittleren und niedrigen Umgebungstemperaturen zum Nulltarif aus der Umgebung.
- Eine (in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur) gleitende Kondensationstemperaturregelung wie die von L&R entwickelte VariKon kann den Energieverbrauch bei mittleren und niedrigen Außentemperaturen erheblich senken.
- Eine weitere empfehlenswerte Maßnahme, die sich in einem vertretbaren Zeitraum amortisiert, ist der Einsatz von drehzahlgeregelten, bedarfsabhängig gesteuerten Pumpen und Kompressoren.

Diese von L&R genutzten Energiespartechiken sorgen dafür, dass im Vergleich mit einer „konventionellen Anlage“ bis zu 80 % der Antriebsenergie eingespart werden können. Und eine solche, in allen Temperaturlagen effiziente Kälteanlage ist dann sogar bis zu 45 % förderfähig! L&R kann für jede Anlage und für jede dieser Maßnahmen die Kosten sowie die zu erwartenden Energieeinsparungen berechnen. Damit ist der Amortisationszeitraum transparent, und der Anwender kann entscheiden, ob er diese Maßnahme bei seiner neuen Kälteanlage umsetzen bzw. integrieren möchte.

## Bei Neuanlagen den Einsatz innovativer Technologien prüfen

Neben diesen bewährten effizienzsteigernden Maßnahmen gibt es auch neue Technologien, mit denen die Effizienz von Kälteanlagen gesteigert werden kann. Hierzu zwei Beispiele:

- Adiabatische PAD-Freikühler können auch bei hohen Außentemperaturen eine Kühlung aus der Umgebung gewährleisten.
- Wärmepumpen im Rückkühlkreis ermöglichen eine Wiederverwendung der Wärme, die in den Prozess eingebracht wird. Mit beiden Technologien hat L&R umfassende und durchweg positive Erfahrungen gesammelt.

In jedem Fall gilt für die Betreiber von Kälteanlagen die Empfehlung, sich bzw. ihre Anlagen auf die prognostizierten höheren Spitzen-Umgebungstemperaturen einzustellen. Der Hersteller aus Sundern hat die Auslegungstemperatur schon mehrfach angepasst, auf der Basis der langfristigen Klimavorhersagen des Deutschen Wetterdienstes.

## Zukunftssichere Kältetechnik mit natürlichen Kältemitteln

Ein weiterer Zukunftsaspekt, der bei der Planung neuer Kälteanlagen und auch bei der Bewertung vorhandener Anlagen zu berücksichtigen ist, betrifft das verwendete Kältemittel. Die F-Gase-Verordnung regelt den schrittweisen Ausstieg aus dem Gebrauch von klimaschädigenden HFKW-Kältemitteln, die in vielen älteren Anlagen eingesetzt werden.

Bei Anlagen mit diesen Kältemitteln darf der Anwender ab einem definierten Zeitraum – in Abhängigkeit u.a. von der Füllmenge – nicht mehr in den Kältekreislauf eingreifen und z.B. Kältemittel nachfüllen. Die Lebensdauer dieser Anlagen ist somit begrenzt.

Alternativen stehen zur Verfügung: Mit natürlichen Kältemitteln wie Propan, die ein extrem geringes Global Warming Potenzial aufweisen, lassen sich sehr energieeffiziente und zukunftssichere Kälteanlagen projektieren. Diese Anlagen (und nur solche) sind zudem BAFA-förderfähig.



Drehzahlgeregelte Pumpen sparen Energie in Kälteanlagen.



Thomas Imenkämper,  
Geschäftsführer Vertrieb,  
L&R Kältetechnik

Wiley Online Library



L&R Kältetechnik GmbH & Co. KG, Sundern  
Tel.: +49 2935 9652 - 0 · [www.lr-kaelte.de](http://www.lr-kaelte.de)

## App-fähige Wärmebildkameras

Flir hat die iXX-Serie vorgestellt, eine neue Generation App-fähiger Wärmebildkameras für Condition Monitoring. Die Kameras basieren auf der ACE-Plattform und integrieren sich direkt in die browserbasierte Assetlink-Software. Dadurch werden radiometrische Wärmebilder automatisch einer hierarchischen Anlagenstruktur zugeordnet. Dies vereinfacht Inspektionsprozesse und unterstützt die Analyse von Anlagenzuständen. Die Kameras bieten eine thermische Auflösung von bis zu 480 × 640 Flir1\_CIT1025Pixeln, eine Genauigkeit von  $\pm 2^\circ\text{C}$  und eine NETD von 40 mK. Die MSX-Bildverbesserung integriert sichtbare Details in Wärmebilder. Die Hardware umfasst eine 8-MP-Kamera und einen hochauflösenden Touchscreen. Die iXX-Serie adressiert Herausforderungen bei thermischen Inspektionen, wie inkonsistente Daten und hohen



Dokumentationsaufwand. Durch App-gesteuerte Prozesse können auch weniger erfahrene Mitarbeitende Inspektionen effizient durchführen. Eine Einführungs-App erleichtert den Einstieg. Die Assetlink-Software ermöglicht die Planung von Inspektionen, Verknüpfung von Wärmebildern mit Anlagendaten und die Erstellung von Berichten. Trendvisualisierungen liefern zusätzliche Einblicke. Die Cloud-Integration über WLAN oder LTE erlaubt das sofortige Teilen und Organisieren von Daten. Kommunikation über Nachrichten, E-Mail und Videoanrufe ist direkt über das Gerät möglich. Die ISO 27001-Zertifizierung und Gerätemanagement-Apps gewährleisten Datensicherheit. Die Kameraserie eignet sich für elektrische und mechanische Inspektionen in Industrie, Gewerbe, Rechenzentren und Energieversorgung sowie für Gebäudeenergieberatung und HLK-Analysen.

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

## Anlagentechnik

### Armaturen



**GEMÜ Gebr. Müller  
Apparatebau GmbH & Co. KG**  
Fritz-Müller-Straße 6-8  
D-74653 Ingelfingen  
Tel.: +49 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.: +49 8104 6498048  
Fax: +49 8104 648779  
E-Mail: [info@noge-technik.de](mailto:info@noge-technik.de)  
<http://www.noge-technik.de>

### Dichtungen/Pumpen



**RCT Reichelt  
Chemietechnik GmbH & Co.**  
Englerstraße 18 · D-69126 Heidelberg  
Tel.: +49 6221 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



**Lutz Pumpen GmbH**  
Erlenstr. 5-7 · Postfach 1462  
97877 Wertheim  
Tel./Fax: +49 9342 879-0/879-404  
[info@lutz-pumpen.de](mailto:info@lutz-pumpen.de)  
<http://www.lutz-pumpen.de>



### JESSBERGER GMBH

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

### Rohrbogen/Rohrkupplungen



**HS Umformtechnik GmbH**  
Gewerbestraße 1  
D-97947 Grünsfeld-Paimar  
Tel.: +49 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)

### Ventile



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

### Gefahrstoffe

#### Gefahrstofflagerung



**Bauer GmbH**  
Eichendorffstr. 62  
46354 Südlohn  
Tel.: +49 2862 709-0  
[info@bauer-suedlohn.com](mailto:info@bauer-suedlohn.com)  
[www.bauer-suedlohn.com](http://www.bauer-suedlohn.com)



**DENIOS SE**  
Dehmer Str. 54-66  
32549 Bad Oeyenhausen  
Fachberatung: +49 800 753 000-3

### Containment



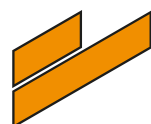
**Bauer GmbH**  
Eichendorffstr. 62  
46354 Südlohn  
Tel.: +49 2862 709-0  
[info@bauer-suedlohn.com](mailto:info@bauer-suedlohn.com)  
[www.bauer-suedlohn.com](http://www.bauer-suedlohn.com)



**DENIOS SE**  
Dehmer Str. 54-66  
32549 Bad Oeyenhausen  
Fachberatung: +49 800 753 000-3

### Ingenieurbüros

#### Biotechnologie



**VOGELBUSCH**

**Biocommodities**

**Vogelbusch Biocommodities GmbH**  
A-1051 Wien · PF 189  
Tel.: +43 154661 · Fax: 5452979  
[vienna@vogelbusch.com](mailto:vienna@vogelbusch.com)  
[www.vogelbusch-biocommodities.com](http://www.vogelbusch-biocommodities.com)

*Fermentation, Destillation  
Evaporation, Separation  
Adsorption, Chromatographie*

## Mechanische Verfahrenstechnik

### Koaleszenzabscheider



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



**THIELMANN ENERGIE TECHNIK GmbH**  
Dormannweg 48 · 34123 Kassel  
Tel.: +49 561 50785-0  
E-Mail: [info@gts-thielmann.de](mailto:info@gts-thielmann.de)  
Website: [www.gts-thielmann.de](http://www.gts-thielmann.de)

### Tröpfchenabscheider



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



**THIELMANN ENERGIE TECHNIK GmbH**  
Dormannweg 48 · 34123 Kassel  
Tel.: +49 561 50785-0  
E-Mail: [info@gts-thielmann.de](mailto:info@gts-thielmann.de)  
Website: [www.gts-thielmann.de](http://www.gts-thielmann.de)

### Vibrationstechnik



**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)

## Thermische Verfahrenstechnik

### Abluftreinigungsanlagen



**ENVIROTEC® GmbH**  
63594 Hasselroth  
Tel.: +49 6055 88 09-0  
[info@envirotec.de](mailto:info@envirotec.de) · [www.envirotec.de](http://www.envirotec.de)



[www.venjakob-umwelttechnik.de](http://www.venjakob-umwelttechnik.de)  
[mail@venjakob-ut.de](mailto:mail@venjakob-ut.de)



A CECO ENVIRONMENTAL BRAND

**WK Wärmetechnische Anlagen  
Kessel- und Apparatebau GmbH**  
Industriestr. 8-10  
D-35582 Wetzlar  
Tel.: +49 641 92238-0 · Fax: -88  
E-Mail: [info@wk-gmbh.com](mailto:info@wk-gmbh.com)  
Website: [www.wk-gmbh.com](http://www.wk-gmbh.com)

### Vakuumsysteme

[www.vacuum-guide.com](http://www.vacuum-guide.com)

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

### Verdampfer



**THIELMANN ENERGIE TECHNIK GmbH**  
Dormannweg 48 · 34123 Kassel  
Tel.: +49 561 50785-0  
E-Mail: [info@gts-thielmann.de](mailto:info@gts-thielmann.de)  
Website: [www.gts-thielmann.de](http://www.gts-thielmann.de)

### Wärmekammern



**Bauer GmbH**  
Eichendorffstr. 62  
46354 Südlohn  
Tel.: +49 2862 709-0  
[info@bauer-suedlohn.com](mailto:info@bauer-suedlohn.com)  
[www.bauer-suedlohn.com](http://www.bauer-suedlohn.com)



**DENIOS SE**  
Dehmer Str. 54-66  
32549 Bad Oeyenhausen  
Fachberatung: +49 800 753 000-3



**Will & Hahnenstein GmbH**  
D-57562 Herdorf  
Tel.: +49 2744 9317-0 · Fax: 9317-17  
[info@will-hahnenstein.de](mailto:info@will-hahnenstein.de)  
[www.will-hahnenstein.de](http://www.will-hahnenstein.de)

|                              |           |                                        |       |                                                       |             |                                                    |       |
|------------------------------|-----------|----------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------|-------|
| AK PAT                       | 20        | Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) | 9, 20 | Lanxess                                               | 15          | Thielmann                                          | 38    |
| Alino                        | 38        | Hamilton                               | 20    | Lutz Pumpen                                           | 38          | TU Braunschweig                                    | 6, 9  |
| Bauer Südlohn                | 38        | Haus der Technik                       | 9     | Meorga                                                | 9           | TU Wien                                            | 20    |
| Bayer                        | 20        | Hoyer                                  | 29    | Messe Frankfurt                                       | 9           | VDI Wissensforum                                   | 9     |
| Covestro                     | 7, 20, 32 | HS Niederrhein                         | 20    | Noge Technik                                          | 38          | VDI-GVC                                            | 32    |
| Dechema                      | 9, 16     | HS-Umformtechnik                       | 38    | Pepperl+Fuchs                                         | 14          | Vega Grieshaber                                    | 4. US |
| Denios                       | 38        | Hte                                    | 7     | Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) | 28          | Venjakob                                           | 38    |
| Endress+Hauser (Deutschland) | 21, 30    | Industriepark Höchst                   | 7     | Profibus Nutzerorganisation                           | Titel, 10   | Verein Deutscher Ingenieure (VDI)                  | 7, 32 |
| EnviroChemie                 | 7         | Ing.-Büro Pierre Strauch               | 38    | Pruvia                                                | 18          | Vogelbusch                                         | 38    |
| Envirotec                    | 38        | Jessberger                             | 38    | R. Stahl                                              | 25          | Vulcan Energie                                     | 7     |
| Findeva                      | 3, 38     | Julabo                                 | 29    | RCT Reichelt Chemietechnik                            | 38, Beilage | Will & Hahnenstein                                 | 38    |
| Flir Systems                 | 37        | Jumo                                   | 26    | RWTH Aachen                                           | 28, 9       | WK Wärmetechnische Anlagen Kessel- und Apparatebau | 38    |
| GEMÜ Gebr. Müller            | 38        | L&R Kältetechnik                       | 36    | TH Mannheim                                           | 20          |                                                    |       |

## Impressum

### Herausgeber

GDCh, Dechema e.V., VDI-GVC

### Verlag

Wiley-VCH GmbH  
 Boschstraße 12, 69469 Weinheim  
 Tel.: +49 6201/606-0,  
 processtechnology@wiley.com,  
 www.processtechnology.wiley.com

### Geschäftsführer

Dr. Guido F. Herrmann

### Group Vice President

Harriet Jeckells

### Publishing Director

Steffen Ebert

### Produktmanager

Dr. Michael Reubold  
 Tel.: +49 6201/606-745  
 michael.reubold@wiley.com

### Chefredakteurin

Dr. Etwina Gandert  
 Tel.: +49 6201/606-768  
 etwina.gandert@wiley.com

### Redaktion

Dr. Volker Oestreich  
 voe-consulting@web.de

### Redaktionsassistentz

Bettina Wagenhals  
 Tel.: +49 6201/606-764  
 bettina.wagenhals@wiley.com

### Fachbeirat

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 15.000  
 IWW Auflagenmeldung: Q2 2025  
 Gesamtverbreitung 19.083  
 davon 4.260 E-Paper (tva)

### Bezugspreise Jahres-Abo 2025

10 Ausgaben 234,40 €, zzgl. MwSt.  
 Schüler und Studenten erhalten unter  
 Vorlage einer gültigen Bescheinigung  
 50 % Rabatt.

Im Beitrag für die Mitgliedschaft bei der  
 VDI-Gesellschaft für Chemieingenieurwesen  
 und Verfahrenstechnik (GVC) ist der Bezug  
 der Mitgliederzeitschrift CITplus enthalten.

CITplus ist für Abonnenten der Chemie  
 Ingenieur Technik im Bezugspreis enthalten.  
 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)  
 Elli Palzer (Layout/Litho)

### Anzeigen

Zurzeit gilt die Anzeigenpreisliste  
 vom 1. Oktober 2025

### Stefan Schwartz

Tel.: +49 6201/606-491  
 sschwartz@wiley.com

### Thorsten Kritzer

Tel.: +49 6201/606-730  
 tkritzer@wiley.com

### Hagen Reichhoff

Tel.: +49 6201/606-001  
 hreichhoff@wiley.com

### Sonderdrucke

Bei Interesse an Sonderdrucken  
 wenden Sie sich bitte an  
**Stefan Schwartz**,  
 sschwartz@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 einge-  
 sandte Manuskripte übernehmen wir keine Haftung!  
 Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung  
 der Redaktion 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 gesellschafts-  
 rechtliche 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**

# Sie haben höchste Ansprüche? Denen sind wir mit Sicherheit gewachsen!



Sicherheit hat in der Chemieindustrie Priorität. Genauso wie die Wahl der richtigen Messtechnik für Füllstand und Druck. Verlassen Sie sich darauf: Unsere leistungsstarken Sensoren lieben Herausforderungen. Sie stehen für Zuverlässigkeit, Genauigkeit und unzählige Möglichkeiten, sich den Anforderungen ihrer Anwender perfekt anzupassen.

**Alles wird möglich. Mit VEGA.**