

Prozesstechnik auf der ACHEMA 2015

Dana Pfenning und Michael Kleiber*

DOI: 10.1002/cite.201500150

Etwa 3800 Aussteller, etwa 170 000 Besucher – die Kennzahlen der ACHEMA bleiben seit Jahren konstant hoch, so dass die ACHEMA auch diesmal wieder ihre Position als weltweit größte Messe für Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie festigen konnte. Erstmals kamen sowohl die Mehrzahl der Aussteller als auch die Mehrzahl der Besucher aus dem Ausland, was im Zeitalter der Globalisierung ebenfalls positiv zu bewerten ist.

Was Innovationen in der Prozesstechnik angeht, so wurde mit Spannung die Aufarbeitung des Fokusthemas „Biobased-World“ erwartet. Eine Veranstaltung zum Thema war die Podiumsdiskussion „Bioökonomie in der Shale-Gas-Falle“. Diese bot Einblicke in unterschiedliche Sichtweisen und Einschätzungen zur Entwicklung biobasierter Prozesse. Der Wechsel auf biobasierte Rohstoffe, der langfristig sicher eine wichtige Option darstellt, wird durch den Shale-Gas-Boom möglicherweise in die Zukunft geschoben. Durch die Fracking-Erfolge werden Öl und Gas als Rohstoffe immer billiger verfügbar, insbesondere das sogenannte Erdgas mit hohen C2–C4-Anteilen. Der Trend scheint noch für viele Jahre beständig zu sein, und somit entsteht kein äußerer Druck, bei den Standardprodukten in der chemischen Industrie einen Rohstoffwechsel vorzunehmen.

Die Preise werden durch den Shale-Gas-Boom sowie durch die Gegenmaßnahmen der OPEC stark beeinflusst; es ist unklar, auf welcher Basis man eine Großinvestition kalkulieren kann. Hinzu kommt, dass Anlagen für Produkte auf biotechnologischer Basis in der Regel kleinere Kapazitäten haben, aber

trotzdem im Wettbewerb bestehen müssen. Biopolymere mit Kapazitäten von 5000–10 000 Jahrestonnen sind bei den derzeitigen Ölpreisen kaum wirtschaftlich, und eine Infrastruktur für den Transport ist meist nicht vorhanden. Ein Preisaufschlag gegenüber den mit konventionellen Prozessen hergestellten Produkten ist bestenfalls bei Spezialitäten denkbar, und dann auch nur in geringem Umfang [1]. Prozesse mit Kohlehydraten als Rohstoff stehen auch wegen der bekannten Tank-Teller-Diskussion in der Kritik, wonach mögliche Nahrungsmittel nicht in Konkurrenz zu chemischen Produkten oder Treibstoffen stehen sollten. Auch hier wird nach weiteren alternativen Rohstoffen gesucht, die keine Konkurrenz zu Nahrungsmitteln darstellen.

Doch auch wenn beim Megatrend „Bio“ zumindest zur Zeit keine Euphorie herrscht, konnten bei der ACHEMA in vielen Gebieten signifikante Fortschritte erzielt werden, die im Folgenden aus Sicht der Autoren ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder eindeutige Priorisierung geschildert werden.

Mikroverfahrenstechnik

Seit mehreren Jahren vertreibt die Ehrfeld Mikrotechnik BTS GmbH die Reaktortechnologie Miprowa. Dabei handelt es sich im Prinzip um einen Rohrbündelwärmetauscher, bei dem die Rohre durch Rechteckkanäle ersetzt sind (Abb. 1).

Die Mikrokanäle haben Abmessungen im mm-Bereich (1,5 mm × 12 mm oder 3,2 mm × 18 mm). In derart engen Kanälen können sich nur laminare Strömungen ausbilden, die normalerweise ausgesprochen schlechte Wärmeübergangsbedingungen bieten. Dies wird auf zweierlei Weise kompensiert. Zum einen ist das Verhältnis Oberfläche/Volumen um fast eine Grö-



Abbildung 1. Miprowa-Reaktor.

ßenordnung höher als etwa bei 1"-Rohren, so dass im Verhältnis mehr Wärmeübertragungsfläche zur Verfügung steht. Zum anderen wird in die Kanäle eine Kammschicht eingebracht (Abb. 2), die wie ein statischer Mischer wirkt. Dadurch werden die laminar strömenden Schichten ständig umgelagert und vermischt, was den Wärmetransport effektiv verbessert. Der Miprowa-Reaktor ist in der Lage, ein Produkt schnell und kontrolliert aufzuheizen oder abzukühlen. Es werden Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $2500 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ bei wässrigen Systemen und ca. $800 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ bei organischen Flüssigkeiten erreicht.

Darüber hinaus ist der Miprowa-Reaktor weitgehend unempfindlich gegen Fouling. Die Kammschicht, auf der sich Ablagerungen niederlassen würden, kann einfach herausgezogen (Abb. 1) und außerhalb des Apparates gereinigt werden.

Der Miprowa-Reaktor hat das Versuchsstadium in Nischenanwendungen hinter sich und bedient inzwischen größere Maßstäbe mit Durchsätzen bis zu 630 L h^{-1} . Er wird häufig angewendet bei schnellen und stark exothermen Reak-



Abbildung 2. Kammschicht in den Rechteck-Kanälen.

Dana Pfenning, Dr. Michael Kleiber (michael.kleiber@thyssenkrupp.com), ThyssenKrupp Industrial Solutions AG, Business Unit Process Technologies, Friedrich-Uhde-Straße 2, 65812 Bad Soden/Taunus, Deutschland.

tionen wie Ethoxylierungen, Sulfonierungen, Nitrierungen oder Reaktionen mit Peroxiden. Drücke bis zu 150 bar und Temperaturen bis 250 °C sind beherrschbar. Explosionen und giftige Stoffe bieten wegen des geringen Hold-ups in einem Kanal ein wesentlich kleineres Gefährdungspotenzial. Ebenso kann der Apparat bei stark korrosiven Medien auch aus Hastelloy gefertigt werden. Die typischen Vorteile der Mikroreaktionstechnik bleiben auch bei der Anwendung im größeren Maßstab erhalten. So kann ein Prozess auf einer Rasterplatte mit mehr als 30 unterschiedlichen Modulen aufgebaut und getestet werden. Die Übertragung in den Produktionsmaßstab erfolgt dann durch Numbering-up; die typische Scale-up-Problematik wie bei konventionellen diskontinuierlichen Reaktoren entfällt. Mehrstufige Synthesen sind in einem Apparat möglich, da es mannigfaltige und flexible Zudosagemöglichkeiten gibt. Durch den guten Wärmeübergang können empfindliche Substanzen bei niedrigen Wandtemperaturen und kurzer Verweilzeit schonend aufgeheizt werden. Berührungsgängste gibt es häufig immer noch beim Übergang von den etablierten Batch-Prozessen zu kontinuierlichen Prozessen in Fein- und Spezialchemie sowie im Pharmabereich. Parallel zu anderen Herstellern, z.B. Corning oder 3M/Chemtrix, versucht man hier, sichtbare Referenzbeispiele zu schaffen, um die Marktentwicklung für die Technologieplattform zu beschleunigen.

Biomass to Liquid

Seit 2005 wird mit Spannung das am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelte bioliq[®]-Verfahren verfolgt. Insbesondere auch im Hinblick auf andere Verfahren zur Umwandlung von Biomasse ist hier interessant, inwieweit dem Nachteil der weiträumigen Versorgung mit geeigneten Rohstoffen für eine großtechnische Nutzung begegnet werden kann.

Das Konzept von bioliq[®] besteht darin, dass in mehreren regional verteilten Anlagen durch Pyrolyse ein energiereiches Zwischenprodukt hergestellt wird, der sog. Biosyncrude. Dieser ist lager- und transportstabil und lässt sich

wirtschaftlich über große Strecken zu einer Zentralanlage transportieren [2].

Der verwendete Rohstoff ist Restbiomasse wie Stroh, keinesfalls ein einfaches Material, denn Stroh lässt sich schwer häckseln und besitzt einen hohen Asche-, aber einen relativ geringen Energiegehalt (2 GJ m⁻³, ca. 5 % des Wertes von Dieselloststoff). Aber es ist auch ein Rohstoff mit großem Mengenpotenzial, der nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung steht. Im bioliq[®]-Prozess wird das kleingehäckselte Stroh innerhalb von Sekunden durch die Vermischung mit großen Mengen heißen Sandes aufgeheizt und zu einem organischen Kondensat (60 %), Koks (20 %) und nicht-kondensierbaren Pyrolysegasen umgesetzt. Während die Gase als Energieträger zur Aufheizung des Sandes dienen, werden Kondensat und Koks zu einer Suspension vermischt und als Biosyncrude zu einer Zentralanlage transportiert. Dieser wird dort in einem Flugstromvergaser bei ca. 1200 °C und 80 bar in Anwesenheit von Sauerstoff und Wasserdampf zu einem Synthesegas aus ca. 50 % H₂ und ca. 50 % CO umgesetzt. Das Synthesegas ist praktisch methanfrei. Die mineralischen Anteile der Biomasse laufen als flüssige Schlacke ab. Der Biosyncrude hat bereits einen Energiegehalt bis zu 25 GJ m⁻³, was einen Transport bezogen auf die Kosten sinnvoll ermöglicht.

Nach einer Reinigung, bei der Asche, Ruß, HCl, H₂S, CO₂ sowie Alkali- und Schwermetalle abgetrennt werden, folgt

eine katalytische Konversion stickstoffhaltiger Stoffe (HCN, NH₃). Das so behandelte Synthesegas wird in einem isothermen Reaktor bei 250 °C und 60 bar zu Dimethylether (DME) gemäß Gl. (1) umgesetzt.



Durch Dehydrierung, Isomerisierung und Oligomerisierung wird bei 350–450 °C und 25 bar nach Gl. (2) der DME zu Kraftstoff weiterverarbeitet, der eine Qualität wie Benzin mit einer hohen Oktanzahl hat.



Um 1 kg Benzin zu erzeugen, werden 8 kg trockenes Stroh benötigt. Als Biomasse kann alles verwendet werden, was nicht mehr als etwa 15 % Wasser hat, so z. B. auch Holzpellets oder trockener Biomüll. Das so hergestellte Benzin ist heute noch nicht konkurrenzfähig; die Herstellungskosten werden auf 1–1,8 € L⁻¹ (vor Steuern) geschätzt. Etwa 1/3 des Energieinhalts der Biomasse verbleibt im Kraftstoff, während der Rest den Energiebedarf des Prozesses vollständig deckt. Die Energiedichte des Kraftstoffs beträgt ca. 36 GJ m⁻³. Neben gewöhnlichem Otto-Kraftstoff können aus dem Synthesegas auch Kerosin oder Diesel hergestellt werden. Das bioliq[®]-Verfahren wurde 2014 in einer Pilotanlage (Abb. 3) erstmals über die gesamte Prozesskette betrieben.



Abbildung 3. bioliq[®]-Pilotanlage bei Nacht.

Dabei können 500 kg Stroh pro Stunde verarbeitet werden. Abb. 4 zeigt die Zwischenstufen bei der Herstellung des Biokraftstoffes.



Abbildung 4. Zwischenstufen bei der Herstellung von bioliq®. Im Gegenuhrzeigersinn: Stroh, Pyrolyseöl, Pyrolysekoks, Biosynchrude, Kraftstoff.

Die nächsten Ziele sind der stabile Betrieb der Pilotanlage über längere Versuchszeiten, die weitere Optimierung des Prozesses und die Markteinführung des Kraftstoffes. Die Pilotanlage dient auch als Forschungsplattform; derzeit laufen dort über 20 Doktorarbeiten zu spannenden wissenschaftlichen Themen aus dem Umfeld der bioliq®-Technologie.

Beim von der Fa. Choren Industries GmbH entwickelten Carbo-V-Verfahren konnte in der Demonstrationsanlage in Freiberg bis zur Insolvenz im Jahr 2011 der „Proof-of-principle“ erbracht wer-

den, aber es gelang nicht, einen stabilen Betrieb unter Beweis zu stellen. Die Linde AG, Engineering Division erwarb die Technologie im Frühjahr 2012, auch um Synergien mit Linde-eigenen Technologien beim späteren Bau von Anlagen zu nutzen. Nach dem Erwerb wurde ein Konsolidierungsprojekt gestartet, um die Designprobleme der Anlage zu überwinden und einen stabilen Betrieb der Anlage mit 100 % Kapazität zu gewährleisten. Die gefundenen Lösungen im Engineering, die auf bewährtem Know-how aufsetzen bzw. durch Hochschulversuche und komplexe Simulationen bestätigt wurden, lassen erwarten, dass eine zu bauende Anlage substantiell höhere Betriebszeiten aufweist. Abb. 5 zeigt ein Schema des konsolidierten Prozesses.

Die Biomasse, Holz in weitestem Sinne, wird ohne Vorbehandlung zunächst getrocknet und anschließend unter Zugabe von Sauerstoff und Dampf in einem 1. Schritt bei 450 °C partiell oxidiert. Dabei fallen Pyrolysegas und Koks an. Das Pyrolysegas wird dann in einer 2. Stufe bei 1400 °C nachoxidiert, wobei Roh-Synthesegas entsteht. Der Koks wird anschließend in das heiße Gas eingeleitet, wodurch die Ausbeute nach Durchlaufen der 3. Stufe, der Wirbelschichtvergasung bei ca. 1000 °C, erhöht wird. Das Roh-Synthesegas wird gekühlt und von Feinstaub aus Asche und Rest-

koks gereinigt. Nach einer Wasserwäsche steht dann das Synthesegas bei niedriger Temperatur zur Umwandlung in nachfolgenden Synthesen wie z. B. der Fischer-Tropsch-Synthese in einen Kraftstoff, in Methanol oder in andere Chemikalien zur Verfügung. Das Synthesegas ist teerfrei, methanarm (0,1 – 0,2 %) und wassergesättigt, Hauptbestandteile sind Wasserstoff (ca. 32 Mol.-%), CO (ca. 40 Mol.-%), CO₂ (ca. 25 Mol.-%).

Rückblickend betrachtet ist das Carbo-V-Verfahren bei der Konsolidierung nicht wesentlich verändert worden. Stattdessen wurden konsequent die Probleme beseitigt, die üblicherweise in einem solchen Prozess mit Feststoffen und schwankenden Stückgutgrößen erwartet werden. Die Maßnahmen umfassten etwa Verbesserungen beim Transportsystem für Feststoffe, bei den Dichtungen in den Hochtemperaturanwendungen, bei der Entfernung der Schlacke aus dem Prozess und bei den Details in der Apparategestaltung. Insbesondere aber wurde die Komplexität der Anlage deutlich verringert. Die Zahl der Apparate konnte um 40 % gesenkt werden, und die gesamte Bauhöhe wurde um ca. 30 m verringert. Linde arbeitete auch zusammen mit BASF SE und akademischen Partnern in einem vom BMBF geförderten Projekt an einer weiteren Verwendungsmöglich-

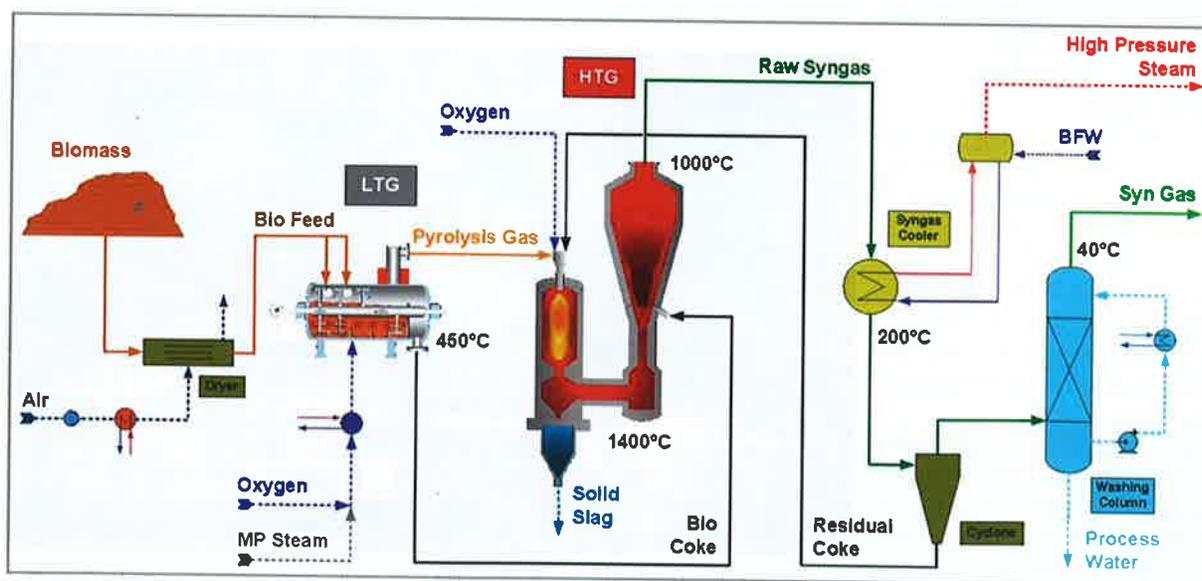


Abbildung 5. Konsolidierter Carbo-V-Prozess.

keit für Synthesegas – der direkten Herstellung von Dimethylether. Neben der Katalysatorentwicklung wurde ein neues Verfahrenskonzept erarbeitet, das auch die Integration der Prozessstufen und eine mathematische Optimierung beinhaltet. Während des Projekts wurde die Entwicklung durch Experimente im Labor und Technikum validiert. Gegenüber der konventionellen Darstellung von Dimethylether über Methanol weist das neuartige Verfahren eine höhere Energieeffizienz auf und reduziert dadurch die CO₂-Emissionen. Dimethylether kann als alternativer Brennstoff in Gasturbinen und Dieselmotoren sowie als Ersatz für Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas; LPG) verwendet werden. DME besitzt hervorragende Verbrennungseigenschaften und senkt dabei CO-, NOx- und Partikelemissionen. Ebenso ist Dimethylether ein Ausgangsstoff für weitere chemische Zwischenprodukte.

Modulare Wasserstoffeinheit

Wenn der Bedarf hoch genug ist, wird Wasserstoff in der Chemischen Industrie vom Verbraucher direkt vor Ort selbst produziert, bis zu Kapazitäten von 1000 kg h⁻¹. Es besteht jedoch häufig auch ein Bedarf an relativ kleinen Mengen Wasserstoff, bis hinunter zu 30 kg h⁻¹. Für diesen Fall gibt es eine begrenzte Anzahl von wirtschaftlichen Lösungen für die Produktion vor Ort. Alternativ kann der Wasserstoff in flüssiger Form oder gasförmig unter hohem Druck zum Verbraucher transportiert werden. Dies ist nicht immer kostengünstig, da die dazu erforderlichen Speichertanks in der Regel erheblich mehr wiegen als der Wasserstoff selbst. Abgesehen davon, dass flüssiger Wasserstoff nicht immer verfügbar ist, kann der Transport durch schlechte Straßen, schlechte Wetterbedingungen und andere Arten höherer Gewalt behindert werden.

Das System Hydroprime® der Linde AG (Abb. 6) ist ein modulares System zur Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas und stellt eine Alternative zur Versorgung mit kleinen Mengen Wasserstoff dar. Kapazitäten bis hinunter zu 15 kg h⁻¹ (165 Nm³ h⁻¹) sind möglich. Der Wasserstoff wird mit einer Reinheit >99,999 % hergestellt und fällt ohne

zusätzliche Kompression bei einem Druck von 13,8 barg an. Die Herstellung des Wasserstoffs erfolgt über die bewährte Technologie der Dampfreformierung mit anschließender Wassergas-Shift-Reaktion über die Gleichgewichtsreaktionen

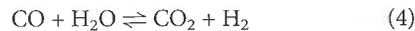
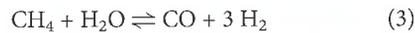


Abbildung 6. Modulares System Hydroprime® von der Linde AG zur Erzeugung von Wasserstoff.

Die Umsetzung erfolgt in einem Rohrreaktor unter Verwendung eines nickelbasierten Katalysators. Die Rohstoffe sind Erdgas mit einem Methananteil >90 % und reines Wasser. Die modulare Anlage kann an kleinere Methangehalte im Erdgas und unterschiedliche Reinheitsanforderungen für den Wasserstoff angepasst werden. Das Hydroprime®-System verfügt über eine effektive Wärmeintegration, was sich in niedrigen Betriebskosten widerspiegelt. Durch die hohe Zuverlässigkeit und den sicheren Betrieb kann es mit ausfallsicheren Regelungssystemen vollautomatisch und ohne Aufsicht über das Prozessleitsystem betrieben werden.

Mit 3 m × 3 m × 14 m ist die Anlage sehr kompakt; ihr Gewicht beträgt 31 t, die Lieferzeit ca. 11 Monate. Durch die modulare Bauweise im Open-Skid-Design sind eine einfache Installation und eine gute Zugänglichkeit bei der Wartung gewährleistet.

Damit bietet Linde bei Wasserstoffanlagen das komplette Portfolio von 165 – 130 000 Nm³ h⁻¹ an, das für individuelle Bedürfnisse des Kunden maßgeschneidert werden kann.

Kompakter Gas-to-Liquid-Prozess

Um Downscaling geht es auch beim Produkt der Fa. IneraTec, einem Start-up-Unternehmen aus dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die Technologie von IneraTec basiert auf einer neuartigen und effizienten chemischen Reaktortechnologie, mit der methanhaltige Gase dezentral in flüssige synthetische Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden können. Die chemischen Reaktoren sind darüber hinaus so kompakt, dass das gesamte Verfahren in eine Containeranlage integriert werden kann. Der Grundgedanke ist, dass es in Deutschland und weltweit viele kleine Vorkommen an Erdgas und weiteren methanhaltigen Gasen gibt, deren Verwertung mit traditionellen großtechnischen Prozessen ökonomisch nicht sinnvoll ist. Solche Gasmengen werden bis heute entweder in einem Blockheizkraftwerk zu Strom und Wärme umgewandelt, oder im ungünstigsten Fall ungenutzt verbrannt. Dazu zählen Erdölbegleitgase oder Gase aus kleinen Erdgasfeldern. Bereits stillgelegte Gasfelder könnten ebenfalls wiederbelebt werden, da der Abtransport der erzeugten flüssigen Kohlenwasserstoffe aufgrund der höheren Energiedichte gegenüber Gas wirtschaftlich Sinn macht. Analog können mit dieser Technologie auch erneuerbare Gase wie Bio- und Klärgase in synthetische Kohlenwasserstoffe mit hoher Energiedichte umgewandelt werden, anstatt diese vor Ort sofort zu verstromen. Durch die hohe Effizienz des Gesamtverfahrens von IneraTec wird die notwendige Abwärmenutzung bei der sonst üblichen Stromerzeugung vermieden. Die erzeugten flüssigen Kohlenwasserstoffe können in die Kraftstofffraktionen Benzin, Kerosin und Diesel aufgetrennt werden und direkt konventionellem Kraftstoff beigemischt werden (drop-in fuel). Die synthetisch erzeugten Kraftstofffraktionen sind qualitativ hochwertig: Sie besitzen einen hohen Energiegehalt, eine hohe Cetan- bzw. Oktanzahl und einen niedrigen Aromatengehalt, der zu einer rußverminderten Verbrennung führt. Bei der Umwandlung von Biogas basierend auf Reststoffen können sogenannte Kraftstoffe der zweiten Generation mit

hohem Treibhausgasminderungspotenzial hergestellt werden.

IneraTec ermöglicht eine Nutzung all dieser Gase durch eine modular aufgebaute Anlage (Abb. 7), die eine Synthesegaserzeugung und eine Fischer-Tropsch-Synthese enthält. Die geplanten Kapazitäten sind zunächst 2–50 Barrel (ca. 320–8000 L) pro Tag. Die Fischer-Tropsch-Anlagen der Mineralölkonzern arbeiten demgegenüber mit Kapazitäten von über 10 000 Barrel pro Tag. Eine Skalierung der konventionellen Technologie ist weder ökonomisch noch technisch sinnvoll.

Inklusive Entschwefelung, Kompression und Produktkondensation lässt sich die Anlage in gewöhnlichen 40-Fuß-Containern integrieren und kann schlüsselfertig zum Kunden bzw. von einem zum anderen Standort transportiert werden. Möglich wird dies durch die Anwendung der Mikroreaktionstechnik. Die Reaktion findet in kleinen Kanälen im Submillimeter-Maßstab statt. Die Abfuhr der Reaktionswärme erfolgt über eine innovative Verdampfungskühlung. Dadurch kann sie wieder im Prozess genutzt und die Effizienz erhöht werden. Die chemischen Reaktoren sowie die Containeranlage sind modular aufgebaut und daher gut skalierbar. Die Variation der Kapazität ist durch die Modulbauweise risikofrei. Die Anlagen laufen vollautomatisiert und werden fernüberwacht.

IneraTec ist in der Aufbauphase der ersten containerbasierten Demonstrations-

anlage. Nach der Demonstration sollen serienreife IneraTec GTL-Anlagen geplant, hergestellt und verkauft werden. Eine internationale Expansion sowie eine Ausweitung der Technologie auf andere chemische Reaktionen, wie z. B. die Methanolsynthese, sind geplant. Auch bei zurzeit niedrigem Ölpreis sind die Anlagen rentabel. IneraTec bleibt offen für strategische Investoren und Partner.

Neue Einbauten für die Destillation

Die Entwicklung der Füllkörper hat in den letzten Jahrzehnten einen weiten Weg zurückgelegt. Füllkörper der 1. Generation waren Kugeln, zylindrische Ringe (Raschig-Ringe) und Sattelförmige. Sie waren einfach zu fertigen, hatten aber noch einen hohen Druckverlust. In der 2. Generation (z. B. Pall-Ringe) wurden die Mantelflächen durchbrochen und auf diese Weise der Druckverlust verringert. Die Füllkörper der 3. Generation (z. B. IMTP-Ring) sind die sog. Gitterfüllkörper, die praktisch nur noch aus einem Gerüst bestehen. Ihr großer freier Strömungsquerschnitt sorgt für äußerst geringe Druckverluste, die mit den Füllkörpern der 4. Generation noch einmal verringert werden konnten. Der Fortschritt bei den Füllkörpern lag stets darin, dass bei gleichem Kolonnen-durchmesser immer größere Durchsätze erzielt werden konnten. Der Fortschritt in der Trennleistung war dagegen vergleichsweise gering [4]. Angesichts dieser bemerkenswert erfolgreichen Ent-

wicklung wird klar, dass die Performance von Füllkörpern nicht beliebig weiter gesteigert werden kann. Hinsichtlich der Handhabbarkeit lassen sich freilich noch Fortschritte erzielen, wie der neue NeXRing™ der Fa. Sulzer zeigt (Abb. 8).



Abbildung 8. Sulzer NeXRing.

Der NeXRing™ hat die typischen hydraulischen Eigenschaften eines Füllkörpers der 4. Generation mit großen und gleichförmigen offenen Querschnitten in jeder Ausrichtung. Darüberhinaus zeigt er eine hohe mechanische Stabilität beim Befüllen und Entleeren, wodurch er zu einem idealen Füllkörper für Anwendungen wird, bei denen häufige Wechsel der Packung wahrscheinlich sind, etwa bei starkem Fouling oder bei Korrosion. Der NeXRing™ wurde im Technikum von Sulzer ausgiebig getestet, die Ergebnisse wurden durch Vergleichsmessungen in einem unabhängigen Testcenter bestätigt.

Auch bei Bodenkolonnen gibt es mit den Mini Fixed Valves der Fa. Raschig GmbH eine Neuentwicklung, die hohe Durchsätze ermöglicht. Die Steigerung der Kapazität beruht auf der Unterdrückung von Entrainment. Es werden kleine Lochdurchmesser verwendet, so dass die einzelnen Gasströme durch die Löcher weniger Flüssigkeit auf den nächsten Boden mitreißen. Um den Gesamtdurchsatz nicht zu verringern, müssen dann natürlich viele solcher Löcher vorhanden sein. Beim Fixed Valve Typ werden diese Löcher von einem schirmförmigen Aufbau überdeckt (Abb. 9). Dieser Überbau lenkt das Gas in eine horizontale Richtung

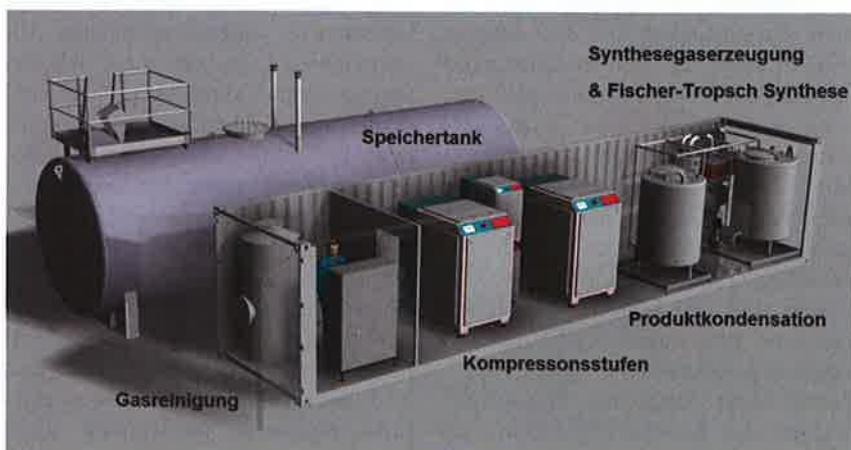


Abbildung 7. Schematische Darstellung einer containerisierten IneraTec GTL-Anlage mit einer Kapazität von 8 Barrel pro Tag.



Abbildung 9. Raschig High Capacity Mini Fixed Valve.

um, wodurch ebenfalls das Entrainment verringert wird. Auf der anderen Seite wird das Gas durch die Form des Schirms recht sanft umgelenkt, so dass sich auch relativ kleine Druckverluste ergeben.

Der Boden wurde in den USA bei der FRI, einem unabhängigen Testcenter, unter Verwendung des Testgemisches Cyclohexan/Heptan geprüft. Gegenüber standardmäßigen Fixed-Valve-Böden mit großen Lochdurchmessern kann eine Kapazitätssteigerung von 10 % erwartet werden. Erste Referenzen sowohl für Neuanlagen als auch für Revamps liegen vor.

Neue Prozesse in der Chemie

Propylenoxid ist ein Stoff, der als Ausgangsprodukt für viele andere Produkte verwendet wird, so z. B. Polyetherpolyole, Propylenglykol oder Polyurethane. Die Herstellung von Propylenoxid war früher immer an Koppelprodukte gebunden, so z. B. Styrol beim POSM-Prozess oder Calciumchlorid beim Chlorhydrin-Prozess. Seit einigen Jahren gibt es den HPPO-Prozess, bei dem Propylen und Wasserstoffperoxid koppelproduktfrei zu Propylenoxid reagieren.

In einer schon seit dem Jahr 2000 bestehenden Zusammenarbeit zwischen der Evonik Industries AG und der heutigen ThyssenKrupp Industrial Solutions AG (vormals Uhde GmbH) wurde das Verfahren gemeinsam entwickelt und 2008 die weltweit erste HPPO-Anlage bei SKC in Ulsan/Südkorea mit einer Kapazität von $100\,000\text{ t a}^{-1}$ in Betrieb genommen und im Jahr 2012 auf $130\,000\text{ t a}^{-1}$ erweitert. Im vergangenen Jahr konnte

die zweite Anlage dieses Typs in Jilin/China für das Joint Venture JiShen mit einer Kapazität von $300\,000\text{ t a}^{-1}$ fertiggestellt werden (Abb. 10). Evonik, die das Wasserstoffperoxid als Rohstoff liefert, entwickelte auch den PO-Katalysator, der kontinuierlich weiterentwickelt wird und so den gesamten Prozess wirtschaftlich noch vorteilhafter macht. Die Kapazität von $300\,000\text{ t a}^{-1}$ konnte durch ein neues Design des Reaktionsteils erreicht werden. Die Destillationssequenz wurde einstraßig ausgeführt, wodurch die Hauptapparate in der Größe erheblich wuchsen. Mit konsequent umgesetzten Verbesserungsmaßnahmen auch im Anlagendesign konnte die Energieeffizienz erheblich gesteigert werden. ThyssenKrupp und Evonik erwarten auf diesem Gebiet weitere Aufträge, da in zunehmendem Maße Altanlagen ersetzt werden müssen und die alten Verfahren nicht mehr zeitgemäß sind.

Wann ein Produkt das Label „Bio“ tragen darf, ist eine vieldiskutierte Frage. Man könnte bereits am Rohstoffwechsel ansetzen und „biobasiert“ als „Produkt aus nachwachsenden Rohstoffen“ auffassen. Der Zucker wird dann auf rein chemischem Weg weiterverarbeitet. Ein Beispiel wäre FDCA (Furandicarbonsäure) [3], die als Ersatzstoff für Terephthalsäure bei der Herstellung von Getränkeflaschen Verwendung werden könnte. Ein weiteres Kriterium wäre die Herstellung auf biotechnologischem Weg über Mikroorganismen, z. B. Bioethanol. „Bio“ wird aber auch oft im

Sinne von „biologisch abbaubar“ verwendet.

Ein Polymer, das alle drei Kriterien erfüllt, ist Polybutylensuccinat (PBS), das bei der Uhde Inventa-Fischer GmbH, Berlin, bereits im Pilotmaßstab produziert wurde. Das Polymer wird über die Polykondensation von Bernsteinsäure ($\text{HOOC-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$) und Butandiol hergestellt; beides Produkte, die aus Glucose über Mikroorganismen hergestellt werden können, wobei für die Bernsteinsäure bereits Anlagen in kommerziellem Maßstab betrieben werden. Die Reaktion erfolgt in zwei Schritten:

- Zunächst wird die Bernsteinsäure an beiden Enden mit je einem Molekül Butandiol unter Abspaltung von Wasser bei Temperaturen von ca. $200\text{ }^\circ\text{C}$ verestert; es entsteht Bis-Hydroxybutylensuccinat. Bei der Reaktion ist auf eine enge Verweilzeitverteilung zu achten, ebenso müssen Druck und Temperatur genau geführt werden.
- Im zweiten Schritt werden die Bis-Hydroxybutylensuccinat-Einheiten unter Vakuum ($0,1\text{--}1\text{ mbar}$) und Temperaturen von ca. $240\text{ }^\circ\text{C}$ und Abspaltung von Butandiol zum PBS polykondensiert. Das Butandiol wird anschließend in den Prozess zurückgeführt.

Die Herzstücke des Verfahrens von Uhde Inventa-Fischer sind der ESPREE[®]- sowie der DISCAGE[®]HV-Reaktor (Abb. 11). Im ESPREE[®]-Reaktor können drei Prozessschritte – Ver-



Abbildung 10. Überblick über die HPPO-Anlage in Jilin/China.

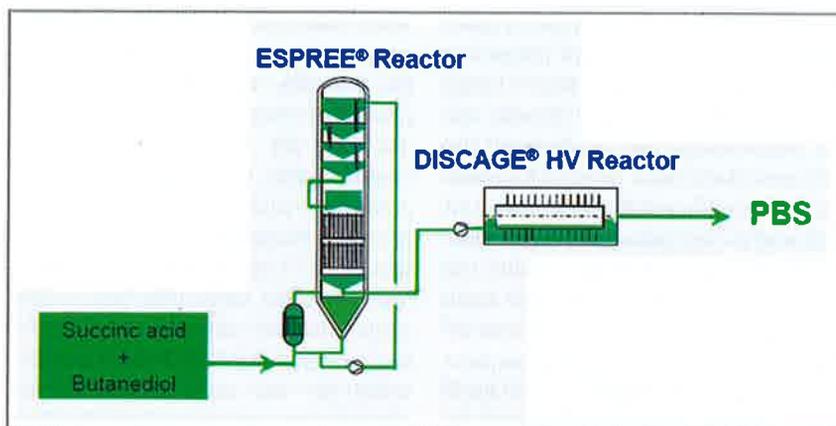


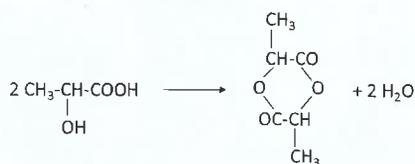
Abbildung 11. ESPREE®- und der DISCAGE®HV-Reaktor im Polybutylsuccinat-Prozess.

esterung, Nachveresterung und Prepolymerisation – in einem einzigen Apparat durchgeführt werden, was zu kleineren Gebäudegrößen, weniger Verrohrung und geringeren Wärmeverlusten führt. Unten in der Veresterung erfolgt die Mischung mit frischem Edukt durch einen Thermosiphon-Kreislauf ohne bewegte Teile. In der Nachveresterung und der Prepolymerisation werden durch die Kaskadierung eine definierte und enge Verweilzeitverteilung sowie optimale Reaktionsbedingungen erreicht. Im DISCAGE®HV-Reaktor findet die Hauptpolykondensation statt. Durch rotierende Scheiben wird in der Polymerschmelze eine große, sich ständig erneuernde Oberfläche erzeugt. Die daraus resultierende Filmbildung ermöglicht eine schnelle Kettenbildung der Moleküle unter schonenden Prozessbedingungen und eine effiziente Abscheidung der flüchtigen Reaktionsprodukte. Die Scheiben sind in einer als ganzes rotierenden Käfigstruktur montiert, wodurch mechanische Belastungen bei den hohen Viskositäten von bis zu 1500 Pa s sicher aufgenommen werden können.

Polybutylsuccinat ist ein nicht transparentes, thermoplastisches Polymer mit einem Schmelzpunkt von ca. 118 °C und guten mechanischen Eigenschaften. Durch seine biologische Abbaubarkeit kann der Kunststoff insbesondere dann eingesetzt werden, wenn eine zeitlich begrenzte Haltbarkeit wünschenswert ist, etwa für Fischereinetze, Mulchfolien (Spargelabdeckung), Joghurtbecher, Ku-

gelschreiber, Verpackungen oder für feuchtes Toilettenpapier. Der biologische Abbau wird durch den Einfluss von Feuchtigkeit eingeleitet, der zur Hydrolyse führt. Die weltweite Produktionskapazität für PBS beträgt zur Zeit nur ca. 25 000 t a⁻¹, der Bedarf sollte aber mit dem Aufzeigen weiterer Anwendungsmöglichkeiten steigen.

Zur Serienreife gelangt ist bei Uhde-Inventa-Fischer auch das Polymilchsäure (PLA)-Verfahren. Beim PLA handelt es sich ebenfalls um ein biotechnologisch hergestelltes und biologisch abbaubares Polymer. Die Schwierigkeit bei der Herstellung besteht darin, dass die Milchsäure (2-Hydroxypropionsäure) nicht direkt polykondensiert werden kann, da auf diese Weise keine ausreichend großen Kettenlängen erreicht werden. Die Polymerisation erfolgt daher über das cyclische Dimer (Dilactid), das zunächst durch Abspaltung von Wasser aus Milchsäure hergestellt wird:



Die Milchsäure mit dem asymmetrischen Kohlenstoffatom in der Mitte des Moleküls ist optisch aktiv, d. h. es gibt eine rechts- und eine linksdrehende Form. Biotechnologisch produzierte Milchsäure ist in der Regel nur linksdrehend. Bei der Weiterverarbeitung

entsteht jedoch durch Racemisierung in einem geringen Umfang rechtsdrehende Milchsäure, so dass bei der Dimerisierung mit einem linksdrehenden Partner „meso-Dilactid“ aus einer links- und einer rechtsdrehenden Milchsäureeinheit entsteht. Dieses meso-Dilactid wird in einer aufwändigen Enantiomeren-trennung destillativ vom regulären Dilactid abgetrennt. Die meso-Dilactid-Fraktion kann zu amorpher Polymilchsäure verarbeitet werden, die für sich oder mit der regulären kristallinen Polymilchsäure verschnitten zu Kunststoffen mit etwas anderen Eigenschaften als das reine PLA (Schmelztemperatur, Festigkeit etc.) weiterverarbeitet werden kann.

Energietragende Stoffe

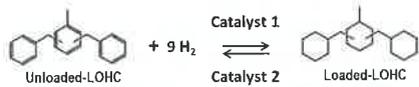
Am Bavarian Hydrogen Center widmen sich Forscher der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg der Entwicklung eines sicheren, alltagstauglichen und regenerativ erzeugten Wasserstoff-Energie-Kreislaufs. Dabei wird überschüssig produzierte Energie, z. B. aus Solar- und Windkraft, in Form von Wasserstoff gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt über eine Brennstoffzelle direkt beim Endverbraucher rückverstromt.

Durch die geringe Dichte von Wasserstoff müsste dieser unter hohem Druck gelagert werden, um das Lagertankvolumen annehmbar klein zu halten. Diese Lagerung erfordert einen hohen apparativen und energetischen Aufwand, ebenso stellt es auch ein hohes Gefährdungsrisko dar. Kleinste Leckagen können zu einer explosiven Atmosphäre führen.

Ziel ist es, ein stationäres Energieversorgungssystem z. B. für Wohnhäuser zu entwickeln, bei dem eine sichere Stromerzeugung erfolgt. Der Trick ist nun, den Wasserstoff nicht molekular, sondern in einem Molekül chemisch gebunden zu speichern. Bei den Speichersubstanzen handelt es sich um eine Gruppe von Molekülen, genannt Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), die Wasserstoff durch eine katalytische Hydrierung chemisch speichern und über eine katalytische Dehydrierung später wieder freigeben. Das vor Jahren vorgeschlagene N-Ethyl-Carbazol (NEC) wies

einige Nachteile auf. Vollständig dehydriertes NEC hat einen hohen Schmelzpunkt, was die Handhabung insbesondere in großen, kontinuierlichen Anlagen komplizierter macht. Außerdem spielen Verfügbarkeit und Qualität eine Rolle.

Die derzeit favorisierte Substanz ist Dibenzyltoluol, ein Stoff, der bereits in technischem Maßstab unter der Bezeichnung Marlotherm® SH als Wärmeträgeröl vertrieben wird. Dieser LOHC lässt sich nach folgendem Schema hydrieren und dehydrieren.



Die Hydrierung ist exotherm, sie erfolgt praktikabel ab 150 °C und 30 bar. Die endotherme Dehydrierung wird bei 300 °C und nahe Umgebungsdruck durchgeführt. Die Speicherdichte des LOHC für Wasserstoff ist extrem hoch, sie kann ca. 60 kg H₂ m⁻³ LOHC betragen. Molekular vorliegender Wasserstoff hätte bei 20 °C eine solche Dichte erst bei einem Druck von ca. 1400 bar. Es gibt bei der Lagerung keine Verluste durch Selbstentladung, und auch beladenes LOHC ist nicht als Gefahrgut eingestuft. Der Einsatz des beladenen LOHCs soll zunächst in Wohnhäusern erfolgen, analog zum gängigen erdöl-basierten konventionellen Energiekreislauf (Abb. 12).

Hierbei wird die über regenerative Energiesysteme gewonnene Energie mittels Elektrolyse in molekularen Wasserstoff umgewandelt. In einem Hydrierreaktor wird das unbeladene LOHC mit dem Wasserstoff beladen und zum Verbraucher transportiert. Die Lagerung erfolgt in einem Tank ohne besondere Anforderungen im Vergleich zur Speicherung von gasförmigem Wasserstoff. Bei Strombedarf wird das beladene LOHC in einen Reaktor geleitet, in dem eine katalytische Dehydrierung stattfindet. Der freigesetzte Wasserstoff wird nach einer Reinigung in der anschließenden Brennstoffzelle verstromt. Das nun unbeladene LOHC wird in einem zweiten Tank gelagert, bis es erneut mit Wasserstoff beladen und so der Kreislauf geschlossen wird. Ein positiver Nebeneffekt ist die bei der Hydrierreaktion freigesetzte Abwärme, die für die Beheizung des Hauses oder zur Warmwassererzeugung verwendet werden kann.

Der nächste Schritt des Projektes ist die Demonstration des Zusammenspiels des Energiespeichers mit Gebäude- oder größeren Wohneinheiten. Hierbei werden ein Hydrier- und ein Dehydrierreaktor installiert. Langzeitziel ist es, in einem großen Haushalt einen geschlossenen Kreislauf von Energieerzeu-

gung, -speicherung und -bereitstellung zu verwirklichen. Dabei wird die Energie mittels Wind- oder Solarenergie direkt am Haus erzeugt. Die Überschussenergie, die zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht benötigt wird, wird durch die Hydrierung des unbeladenen LOHC gespeichert. Wenn der Energiebedarf nicht über die direkte Strom- und Wärmeerzeugung gedeckt werden kann, wird das beladene LOHC in den Dehydrierreaktor eingebracht, und die Verstromung erfolgt wie oben beschrieben. Auf dem ACHEMA-Stand wurde ein Demonstrationsreaktor für die Dehydrierung vorgeführt, bei dem anschaulich die Umwandlung des gespeicherten Wasserstoffs in Strom vorgeführt wurde (Abb. 13). Links ist der Tank für beladenes LOHC zu sehen. Der Wasserstoff würde rechts aus dem Bild zu der Brennstoffzelle hinter dem Reaktor strö-



Abbildung 13. Demonstrationsmodell des Dehydrierreaktors auf dem Gemeinschaftsstand von Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials und dem Departement Chemie- und Bioingenieurwesen auf der ACHEMA.

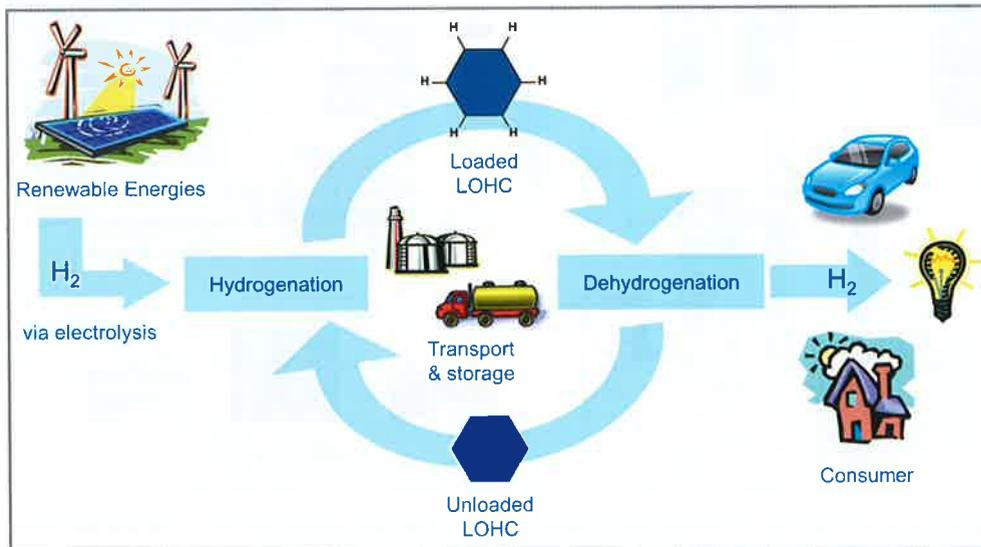


Abbildung 12. Regenerativer Wasserstoffkreislauf mit LOHC für verschiedene Nutzungskonzepte.

men. Rechts (nicht im Bild) befindet sich der Tank für entladenes LOHC.

Die Fa. Hydrogenious Technologies GmbH betreibt auf ihrem Firmengelände in Erlangen bereits eine Demonstrationsanlage zur Speicherung von regenerativer Energie in LOHC mit 50 kW Leistung. Diese besteht aus einer 97 kW-Photovoltaik-Anlage, einem PEM (Proton Exchange Membrane)-Elektrolyseur der Firma Siemens sowie der LOHC-Hydrieranlage. Weitere Anlagen werden derzeit für Kunden aufgebaut, darunter ein LOHC-System für eine Elektrotankstelle in Stuttgart. In der Vorplanung sind weiter eine Wasserstofftankstelle für Flurförderfahrzeuge und LOHC-Anlagen für die industrielle Wasserstofflogistik.

Zero Liquid Discharge

Die Optimierung der Betriebs- und Investitionskosten bei der vollständigen Vermeidung von flüssigen Abfällen (Zero Liquid Discharge) steht bei vielen Firmen im Fokus, auch angesichts immer strenger werdender gesetzlicher Auflagen bei geschlossenen Wertstoffkreisläufen. Mit dem System ZLD.eco2 haben die Stuttgarter H+E GmbH (ehem. Hager + Elsässer GmbH) gemeinsam mit der Kölner MFT GmbH hierzu eine innovative Lösung entwickelt. Dabei wird der anfallende Ab-

wasserstrom in einen gereinigten Wasserstrom und einen Abfallschlamm getrennt (Abb. 14).

Das Abwasser wird zum Abtrennen von Feststoffen und Inhaltsstoffen, die bei einer weitergehenden Aufkonzentrierung Ausfällungen bilden können, gezielt vorbehandelt. Diese Aufbereitungsstufe gewährleistet somit einen verstopfungsfreien Betrieb der nachgeschalteten Membranstufen.

Das vorbehandelte Abwasser wird zunächst in Umkehrosmoseanlagen, die als Nieder- und Mitteldruckstufen arbeiten, geleitet. Diese Umkehrosmosen konzentrieren das Abwasser weiter auf. Die erzeugten Permeate werden dabei in einem separaten Permeat-Tank gesammelt und stehen für eine Wiederverwendung zur Verfügung.

In einem nachfolgenden Prozessschritt wird das vorkonzentrierte Abwasser in eine Hochdruck-Umkehrosmose mit einem Betriebsdruck von bis zu 200 bar geleitet und somit weiter aufkonzentriert. Die hier zugeführte Energie zur Druckerhöhung erhöht die Temperatur des Abwassers.

Diese Erwärmung wird im letzten Prozessschritt energieeffizient genutzt. Das Konzentrat wird in die Verdampferstufe geleitet. Hier wird weiteres Wasser aus dem warmen Konzentrat bei einer zusätzlichen Senkung des Druckes „aus-

geflasht“, d. h. verdampft. Das Eindampfungskonzentrat wird über eine Zentrifuge von Feststoffen (Kristallbrei) befreit und als Schlamm mit einer hohen Feststoffkonzentration ausgeschleust. Das Permeat der Umkehrosmose und das Destillat der Eindampfung können als Prozesswasser wiederverwendet werden. Auf diese Weise wird ein geschlossener Wertstoffkreislauf realisiert.

Membrananwendungen

Die Abtrennung von CO₂ aus Gasströmen ist eine wichtige Standardtrennaufgabe, bei der Membranen eine wichtige Rolle spielen können. Bekannte Anwendungen sind z. B. die Abtrennung von CO₂ aus Erd- oder auch Biogas sowie aus Rauchgasen oder anderen gasförmigen Reaktionsprodukten. Am Institut für Polymerforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht sind in den letzten Jahren mit PolyActive™ und MATRIMID® zwei Membrantypen entwickelt worden, die CO₂ von unterschiedlichen Gasen abtrennen können, wobei größere Flüsse möglich sind als mit Vergleichsmembranen aus Celluloseacetat. So ist die PolyActive™-Membran sehr wirksam bei der Abtrennung von CO₂ aus Stickstoff und aus Wasserstoff, während die MATRIMID®-Membran ihre Stärken bei der Entfer-

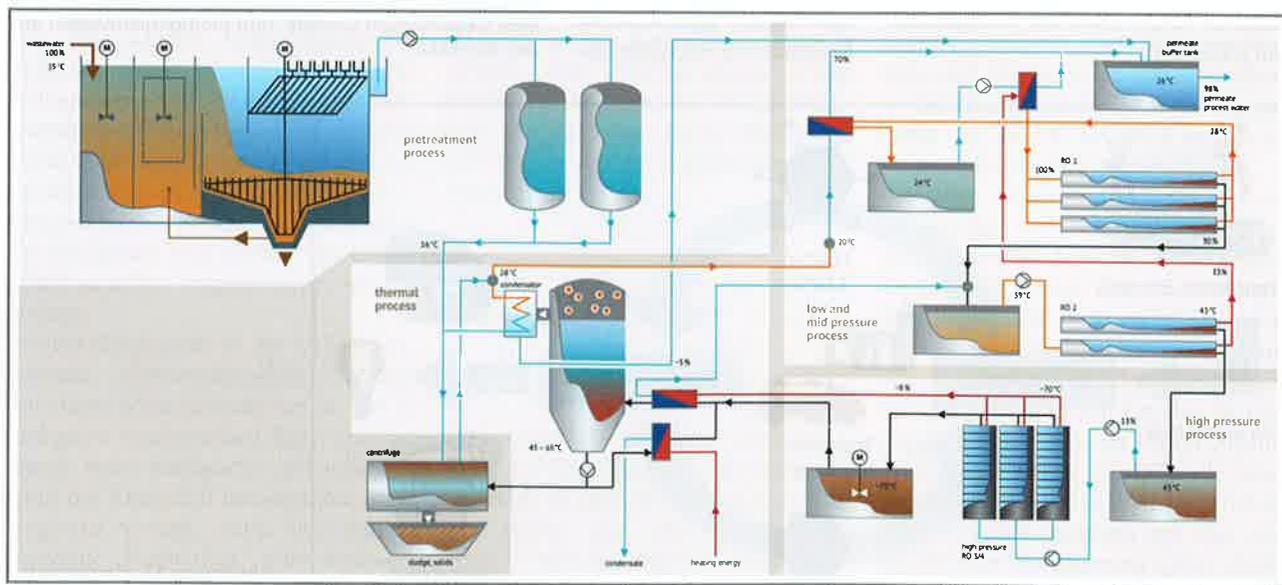


Abbildung 14. Verfahrenskombination zur vollständigen Vermeidung flüssiger Abfälle ZLD.Plus, entwickelt von H+E mit der MFT GmbH.

nung von CO_2 aus Kohlenwasserstoffen wie Methan oder Ethylen hat. Das CO_2 geht dabei jeweils ins Permeat, während die anderen Komponenten zurückgehalten werden. Die Membranen können mit Dicken bis hinunter zu 70 nm im 100 m^2 -Maßstab gefertigt werden.

Die Reinigung von Biogas wurde dabei in einer Pilotanlage getestet [5]. Biogas besteht zu etwa 50–75 % aus Methan und zu 25–45 % aus CO_2 , ggf. sind noch Wasser und Spurengase vorhanden. Da es oft nicht an Ort und Stelle verbraucht werden kann, ist die Entfernung von CO_2 sinnvoll, um die Transportkosten zu verringern. Mit der MATRIMID[®]-Membran kann eine weitgehende Trennung erreicht werden; allerdings ist ein zweistufiger Prozess notwendig, ansonsten wären die Methanverluste ins Permeat mit 30 % zu groß. Das Retentat erreicht dagegen bereits nach einer Stufe eine Reinheit von 95 %.

Die Wirkungsweise der Membran wurde auf der ACHEMA in einer anschaulichen Versuchsanordnung demonstriert (Abb. 15). Die Besucher konnten einen Luftballon aufblasen, der dann nach dem Anschließen an die Membran-Demonstrationsanlage rasch kleiner wurde, da das ausgeatmete CO_2 durch die Membran gedrückt wurde.

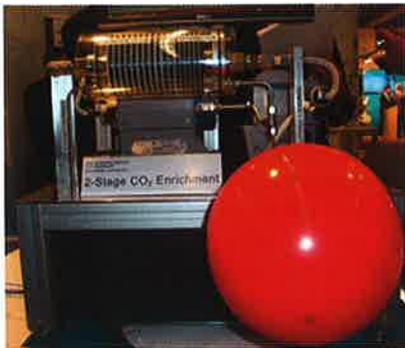


Abbildung 15. Demonstration der Wirksamkeit der PolyActive[™]-Membran.

Neuerungen bei Wärmetauschern

Bei besonderen Anforderungen an die chemische Beständigkeit von Wärmetauschern muss auf Spezialwerkstoffe zurückgegriffen werden. Eine von GAB Neumann angebotene Lösung ist die Verwendung von Siliziumkarbid, ein

schwer zu verarbeitender Werkstoff, der aber sowohl im sauren wie auch im alkalischen Bereich hohe chemische Beständigkeit zeigt.

Abb. 16 veranschaulicht die hervorragende chemische Stabilität von Siliziumkarbid anhand der Abtragsraten bei verschiedenen Medien, abhängig von der Temperatur. Selbst bei Verwendung in konzentrierten Laugen und Säuren und sogar bei Flusssäure bleibt das Material stabil.

Die von GAB Neumann entwickelten Wärmeübertragerbauformen weisen hochturbulente Strömungen auf und sorgen dadurch für hohe Wärmeübertragungszahlen bei sehr geringer Foulung-Neigung und hoher Selbstreinigung. Je nach Bauart kann auf den Einsatz von zusätzlichen Dichtungen verzichtet werden, dadurch wird die Leckage-Gefahr und die Gefahr der Kreuzkontamination minimiert.

Auch bei den Plattenwärmeübertragern ist der Schutz vor Korrosion ein zentrales Thema. Auf dem Stand von Alfa Laval wurde eine neue Baureihe von Tantal-Wärmetauschern eingeführt. Tantal ist ein sehr korrosionsbeständiges Material, das jedoch ausgesprochen teuer ist. Der Kompromiss besteht darin, dass auf die Oberfläche an den korrosionsgefährdeten Stellen mit einer neuartigen Oberflächenbehandlung eine dünne Schicht Tantal aufgebracht wird. Dadurch erreicht man eine hohe Korrosionsbeständigkeit bei geringen Investitionskosten, so dass die Technologie

für eine Vielzahl von Anwendungen bezahlbar bleibt. Die tantalbeschichteten Oberflächen können den meisten korrosiven Materialien bis zu einer Temperatur von 225 °C widerstehen. Der Wartungsbedarf ist erheblich reduziert; einzig ein Cleaning-in-Place-Verfahren zur Beseitigung von Fouling-Belägen ist vorzusehen. Die hervorragenden Wärmeübertragungseigenschaften von Plattenwärmeübertragern ermöglichen sehr kompakte Wärmetauscher und geringe Installationskosten. In vielen anderen Fällen führt die Wahl korrosionsbeständiger Materialien wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit zu Apparaten mit relativ hohem Platzbedarf.

Die Reihe der Alfa Laval DIABON[®] Plattenwärmeübertrager ist mit dem DIABON[®] S15 um die bisher größte Einheit erweitert worden. Er kann einen oder mehrere Rohrbündel- oder Blockwärmetauscher ersetzen. DIABON[®] ist ein kunstharzgetränktes Graphit mit einer feinen und gleichmäßigen Porenstruktur, das von der SGL Carbon SE entwickelt wurde. Es ist für den Einsatz mit korrosiven Medien bei Temperaturen bis zu 200 °C geeignet.

Auch die Performance der Plattenwärmeübertrager wurde gesteigert. Mithilfe von CFD-Simulationen wurde das Strömungsprofil im Plattenwärmeübertrager noch einmal optimiert, so dass sich jetzt ein deutlich gleichmäßigeres Strömungsprofil ohne Totzonen ergibt. Das neue patentierte Verteilungssystem Alfa Laval CurveFlow (Abb. 17) verringert

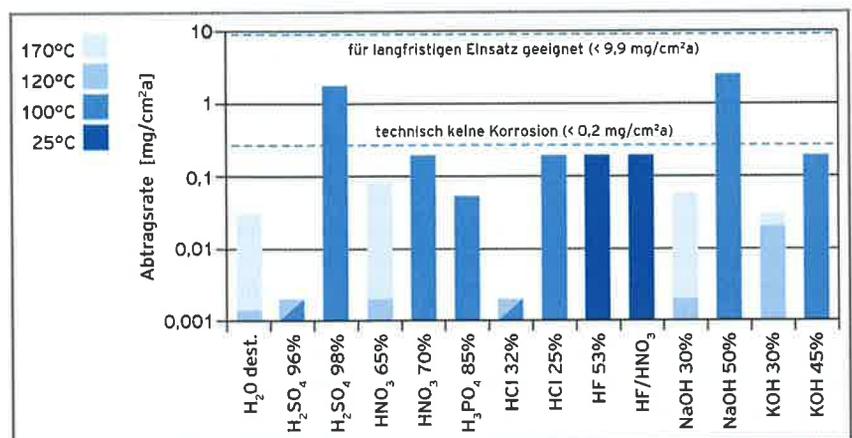


Abbildung 16. Chemische Beständigkeit von drucklos gesintertem Siliziumkarbid (SiC) [6,7].



Abbildung 17. CurveFlow-Plattendesign von Alfa Laval.

das Fouling und verbessert die Wärmeübertragung noch weiter. Auch die Dichtungen konnten verbessert werden. Die neuentwickelten ClipGrip-Dichtungen umspannen beide Plattenseiten, wodurch sie in ihrer Position fixiert sind. Die Verwendung von Klebstoffen ist nicht notwendig. Beide Innovationen werden in der Baureihe Alfa Laval T35/TS35 verwendet.

Literatur

- [1] *Bioökonomie in der Shale-Gas-Falle*, Podiumsdiskussion, ACHEMA, Frankfurt 2015.
- [2] www.bioliq.de
- [3] S. Jenkins, *Chem. Eng.* 2015, 33.
- [4] J. Gmehling, M. Kleiber, S. Steinigeweg, in *Thermische Verfahrenstechnik, Chemische Technik* (Eds: K. Winnacker, L. Küchler), Bd. 1: Methodische Grundlagen, Wiley-VCH, Weinheim 2004.
- [5] T. Brinkmann et al., *J. Membr. Sci.* 2015, 489, 237–247.
- [6] *Corrosion Test Results of Hexoloy®-SA Silicon Carbide*, Produktinformation, Saint Gobain, Courbevoie 2003.
- [7] F. Meschke et al., *Chem. Eng. Technol.* 2005, 28 (4), 467.