

ACHEMA 2018 – Energie

Karsten Müller*

DOI: 10.1002/cite.201800142

Auf der diesjährigen ACHEMA gab es zwar keinen eigenständigen Ausstellungs- oder Themenbereich zur Energie, nichtsdestotrotz spielte die Energie wieder an vielen Stellen eine große Rolle. Ein wesentliches Thema war die Wärme. Hier lag ein Schwerpunkt auf der Abwärmenutzung zur Verbesserung der Energieeffizienz, aber auch bei der Feuerungstechnik gab es neue Entwicklungen. Daneben wurden Neuerungen im Bereich der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme bzw. in Kraftstoffe oder Basischemikalien vorgestellt. Wasserstoff- und biomassebasierte Technologien spielten ebenfalls eine große Rolle.

Schlagwörter: Abwärmenutzung, Bioenergie, Energieeffizienz, Power-to-X-Technologien, Thermische Energie, Wärmebereitstellung

Eingegangen: 29. August 2018; *akzeptiert:* 08. Oktober 2018

ACHEMA 2018 – Energy

At this year's ACHEMA, there was no independent exhibition or thematic area on energy, nevertheless, energy played a major role again. Heat was an important topic. Here, a focus was on waste heat utilization to improve energy efficiency, but also new developments could be found in the field of combustion technology. In addition, innovations in conversion of electrical energy into heat or into fuels or basic chemicals were presented. Hydrogen and biomass-based technologies also played a major role.

Keywords: Bioenergy, Energy efficiency, Heat supply, Power-to-X technologies, Thermal energy, Waste heat utilization

1 Abwärmenutzung

Im Bereich der Wärme ist zunächst die Nutzung von Abwärmern ein wichtiges Thema für die Energieeffizienz. Eine Reihe von Firmen stellte hierfür ihre Technologien vor. Beträchtliche Mengen an sensibler Wärme befinden sich oft in Abwässern. Diese Wärme dissipiert in der Regel ungenutzt in die Umgebung. Durch das niedrige Temperaturniveau ist die energetische Nutzung dieser Wärme anspruchsvoll. Die Schweizer Firma Kasag Swiss AG stellte auf der ACHEMA Wärmetauscherlösungen speziell für die Rückgewinnung von Restwärmern aus Abwässern vor. Laut Modellrechnungen bestünde das Potenzial, aus Haushaltsabwässern über 10 % des Warmwasserbedarfs dieser Haushalte zurückzugewinnen. Die vorgestellten Wärmetauscherlösungen adressieren zunächst die Rückgewinnung von Wärme aus Haushalts- und Industrieabwässern direkt vor Ort. Darüber hinaus werden Produkte zur Downstream-Wärmerückgewinnung angeboten. Kanalwärmeübertrager (Abb. 1) sollen Abwärmern aus Abwasserströmen auf dem Weg zur Kläranlage rückgewinnen. Dies hat den wirtschaftlichen Vorteil, dass größere Mengen prozessiert werden, wird andererseits aber durch ein niedrigeres Temperaturniveau infolge der Vermischung mit kälteren Abwässern



Abbildung 1. Kanalwärmetauscheranlage mit einer Heizleistung von 750 kW bzw. einer Kühlleistung von 1500 kW.
© Kasag Swiss AG.

erkauft. Spezielle Wärmeübertrager, die teilweise auch mit gewissen Verschmutzungsgraden des Wassers arbeiten können, werden für den Einsatz in Kläranlagen oder in Ober-

Dr.-Ing. Karsten Müller
karsten.mueller@fau.de
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für
Thermische Verfahrenstechnik, Egerlandstraße 3, 91058 Erlangen,
Deutschland.

flächengewässern angeboten. Insbesondere Letztere bieten sich vor allem für Klimatisierungszwecke an.

Als Beispiel für die Technologie wurde u. a. eine Anwendung aus der Kühlung von Fettwasser in der Lebensmittelindustrie demonstriert. Neben der Energierückgewinnung ergibt sich hierbei der zusätzliche Vorteil, dass durch die niedrigere Löslichkeit bei niedrigeren Temperaturen der problematische Fetteintrag in die Kanalisation reduziert werden kann. Als Druckverlust wird dabei ein Wert von etwa 0,5 bis 0,9 bar bei einem Volumenstrom von $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ im Primärkreislauf und $6\text{--}9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ im Sekundärkreislauf genannt. Die Temperatur im Sekundärkreislauf kann mit dem System, bei passenden Bedingungen im Primärkreislauf, um bis zu 7°C angehoben werden.

Als Anbieter für Anlagen zur Abwärmenutzung und Energierückgewinnung sowie als Hersteller für energieeffiziente Abluftreinigungsanlagen präsentierte sich die Firma Rotamill auf der ACHEMA. Rotamill plant und konstruiert thermische Produkte wie z. B. Abhitzeessel, Rekuperatoren und Abwärmekomplettssysteme. Besonders im Hochtemperaturbereich kann Abwärme sinnvoll wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Abgase, die mit hohen Temperaturen aus dem Prozess geführt werden, können – je nach Temperatur und Volumenstrom – dazu genutzt werden, das Heizsystem zu unterstützen, Heißwasser zu erzeugen oder sogar zur Dampf- und Stromerzeugung verwendet werden. Dies ist besonders für Industriezweige interessant, in denen Abgase bei hohen Temperaturen anfallen, wie z. B. in der Glasindustrie oder bei Gießereien und Verzinkereien. Im Mittel- und Niedertemperaturbereich, z. B. in der Papierindustrie, kann Abwärme dazu genutzt werden, Energie einzusparen und Prozesse zu optimieren.

Die Abluftreinigungsanlagen von Rotamill zeichnen sich durch eine hohe interne Wärmerückgewinnung aus. Kernstück der Anlagen sind keramische, nicht katalytisch aktive, strukturierte thermische Energiespeicher. Diese befinden sich in den einzelnen Kammern der Anlage. Die schadstoffhaltige Abluft wird durch die heißen Keramikkörper des regenerativen Wärmeübertragers geführt, wobei sich die Abluft bis über die Temperatur der thermischen Umsetzung der VOCs (*volatile organic compounds*) erwärmt. Die Schadstoffe werden in der Brennkammer bei über 800°C nahezu vollständig oxidiert. Zusätzlich reduziert die bei dieser Verbrennung freiwerdende Wärme den Leistungsbedarf des eigentlichen Brenners; die energiebezogenen Betriebskosten bleiben gering. Anschließend durchströmt das heiße, gereinigte Gas einen weiteren regenerativen Wärmeübertrager, wo es seine thermische Energie an den thermischen Energiespeicher abgibt, ehe es die Anlage als saubere Luft verlässt. Mithilfe eines sog. ecoPower-Boosters kann Prozesswärme bis über 200°C zusätzlich nutzbar gemacht werden.

Eine regenerativ-thermische Abluftreinigungsanlage (RTO, regenerative thermische Oxidation; Abb. 2) ist vor allem dort einsetzbar, wo flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOCs) aus der Luft entfernt werden müssen und eine Lösemittlrückgewinnung wirtschaftlich nicht realisierbar ist, z. B. in der Farben- und Lackherstellung, bei Lackieranlagen oder im Bereich der Oberflächentechnik.

Eine andere Art der Abwärmenutzung schlägt die Firma Spilling Technologies vor. Unter dem Stichwort Dampfrecycling bietet sie Dampfkompressoren an, die speziell für die Aufwertung von Heißdampf gedacht sind. Überschüssiger Niederdruckdampf wird auf diese Weise wieder nutzbar

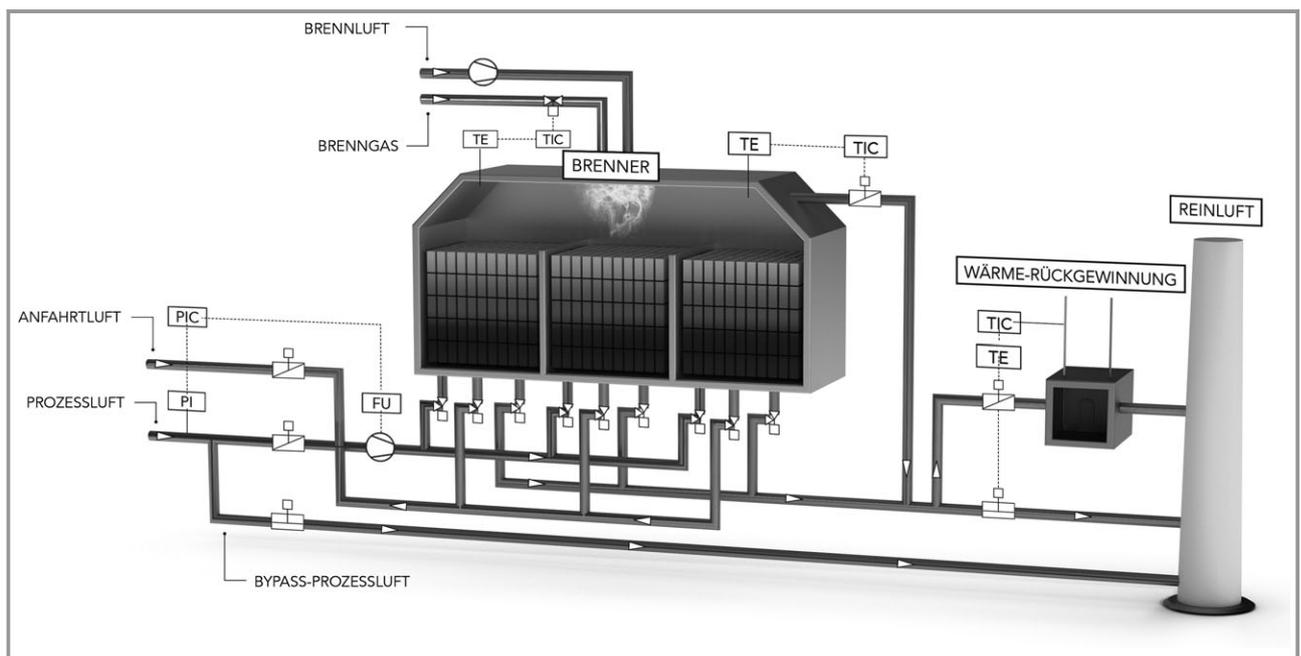


Abbildung 2. Schematische Darstellung einer regenerativ-thermischen Abluftreinigungsanlage. © Rotamill.

gemacht. Abhängig vom Druckverhältnis zwischen Eintritts- und Austrittsdruck kann so bis zum 15-Fachen des eingesetzten elektrischen Stroms in Form von Dampfleistung zurückgewonnen werden. Mithilfe dieser Technologie kann Nutzdampf je nach konventionellem Vergleichsprozess der Dampferzeugung günstiger erzeugt bzw. recycelt werden. Überall dort, wo aus vorhandenem Dampf mit niedrigem Druck Dampf mit höherem Druck erzeugt werden soll, können Spilling-Dampfkompressoren eingesetzt werden. Der wichtigste Anwendungsfall ist überschüssiger Niederdruckdampf, der zurückgewonnen und in nutzbaren Hochdruckdampf umgewandelt werden soll.

Eine weitere Option stellt diese Technologie dar, wenn Hochdruckdampf ohne die Installation einer zusätzlichen Kesselanlage mit hoher Druckstufe verdichtet werden soll. Für ein sinnvolles Kosten/Nutzen-Verhältnis sollten dabei allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein. Der Niederdruckdampf sollte einen absoluten Druck von mindestens 2 bar besitzen und der Faktor der Druckerhöhung sollte einen Wert von etwa 5 nicht übersteigen. Bei wesentlich höheren Kompressionsverhältnissen steigen durch die dann dreistufige Kompression die Investitionskosten beträchtlich an. Unabhängig vom Eintrittsdruck sollte der Austrittsdruck nicht über etwa 35 bar(ü) liegen. Für die praktische Anwendung ist es außerdem wichtig, dass der zu komprimierende Dampf einigermaßen kontinuierlich vorliegt (wenngleich Schwankungen des eintretenden Dampfmassestroms in einem Regelbereich von ca. 35 bis 100 % noch gut machbar und selbst bei schnellen Lastwechseln gut regelbar sind).

Als Anwendungsfelder der Spilling-Dampfkompressoren werden neben der (petro)chemischen Industrie unter anderem die Papier- und Lebensmittelindustrie genannt. Durch den Einsatz dieser Technologie wird ein Potenzial zur Reduktion der Dampfkosten, unter Berücksichtigung der Investition, um bis zu 50 % genannt.

Eine seit Langem weit verbreitete Methode für das Design von Netzwerken für die Wärmeintegration ist die Pinch-Analyse. Sie ermöglicht es, thermodynamisch optimale Verknüpfungen von Wärmequellen und -senken systematisch zu identifizieren, um Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Die Anwendbarkeit auf kontinuierliche Prozesse, bspw. in der chemischen Industrie, ist heute allgemein akzeptiert. Die Anwendung auf Batchprozesse und Anwendungen außerhalb der Verfahrenstechnik sind hingegen zwar auch nicht mehr grundsätzlich neu, die Verbreitung ist aber dennoch verhältnismäßig gering.

Ein Werkzeug um Pinch-Analysen (nicht nur) für diskontinuierliche Prozesse durchzuführen ist die Software PinCH, die von der Hochschule Luzern auf der AICHEMIA vorgestellt wurde. Mit der aktuellen Version der Software (PinCH 3.0) steht nun erstmals ein Werkzeug zur Integration von thermischen Energiespeichern (sowohl Wärme als auch Kälte) zur Verfügung [1]. Dies eröffnet zusätzliche Einsparpotenziale für Batchprozesse, mit denen viele Produkte hergestellt werden. Neben Funktionalitäten zur

Speicherung von Energie bietet PinCH die Möglichkeit, bspw. Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke optimal in die Wärmeversorgung zu integrieren. Neben der rein energetischen Analyse können mit der Software auch direkt Kostenschätzungen für verschiedene Konfigurationen des Wärmenetzwerks und der -speicher durchgeführt werden. Aus dem Vergleich der entsprechenden Investitionskosten mit den eingesparten Energiekosten lässt sich eine nicht nur energetisch, sondern auch ökonomisch sinnvolle Entscheidung treffen. Die Erfahrung aus über 150 durchgeführten Pinch-Analysen in Schweizer Industrieunternehmen zeigt, dass sich der Energiebedarf in der Regel um 10 bis 40 % senken lässt. Die Amortisationszeiten für die Umsetzung der Maßnahmen liegen in der Regel bei etwa zwei bis drei Jahren.

Als Firma, die Pinch-Analysen – neben anderen Methoden – als Werkzeug zur energetischen Optimierung anbietet, stellte sich die DM Energieberatung AG vor. Deren Vertreter konnten zeigen, wie die Pinch-Analyse nicht nur zur energetischen Optimierung von klassischen chemischen Prozessen dienen kann. Am Beispiel einer Schlachtereier wurde die Anwendbarkeit für Fälle gezeigt, die verglichen mit chemischen Anlagen stark diskontinuierlich betrieben werden und nicht zu den klassischen Einsatzbereichen der Pinch-Analyse gehören.

Ein gänzlich anderer, aber sehr interessanter Ansatz ist die Umwandlung von Wärme in andere Energieformen. Eine Möglichkeit zur Nutzung von Wärmen, gerade auf niedrigem Temperaturniveau, stellt der *organic rankine cycle* (ORC) dar. Bei diesem Dampfturbinenprozess werden alternative Fluide eingesetzt, um bei niedrigeren Temperaturen elektrische Energie gewinnen zu können als bei klassischen, mit Wasser betriebenen Dampfturbinen. Ein Anbieter von ORC-Systemen ist Dürr Cyplan. Biogasanlagen sind ein potenzieller Einsatzbereich, in dem ORC-Systeme von Dürr implementiert werden. Durch den starken Anstieg kleiner, dezentraler Biogasanlagen entsteht eine beträchtliche Nachfrage nach kleineren ORC-Einheiten. In der aktuellen Förderlandschaft ist der Einsatz der ORC-Technologie laut Modellrechnung von Dürr ab einer installierten Leistung von ca. 400 kW_{el} für die meisten Biogasanlagen attraktiv. Die standardisierten Eco+Energy ORC-Module von Dürr nutzen die Abgaswärme der Biogasmotoren. Dadurch lässt sich die elektrische Leistungsausbeute erhöhen. Dafür kann die Abgaswärme mehrerer Motoren zusammengeführt und in einer einzelnen ORC-Anlage verwendet werden. Durch die Möglichkeit des Betriebs der ORC-Anlage als stromerzeugender Abgaswärmetauscher mit einer Wärmeauskopplung auf bis zu 90 °C lässt sich die ORC-Anlage in nahezu jedes Wärmekonzept integrieren und trägt zur Erhöhung der Stromkennzahl bei. Die angebotenen ORC-Prozesse sind über einen breiten Bereich skalierbar, um für verschiedene Anforderungen einsetzbar zu sein.

Grundsätzlich lässt sich die Technologie mit unterschiedlichen Abwärmequellen koppeln. Eine häufige Anwendung ist die Steigerung der Effizienz von Energieanlagen, bei

denen nicht auf die Möglichkeit einer Wärmenutzung verzichtet werden soll. In aktuellen Projekten werden verschiedene ORC-Typen in Verbindung mit Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, verschiedensten Feuerungen oder Geothermie eingesetzt, um aus Abwärme Strom und Prozesswärme zu gewinnen. Die Stromausbeute eines biogasgefeuerten Blockheizkraftwerks lässt sich durch den Einsatz des ORCs um etwa 10 % steigern. Für eine 70-kW-ORC-Anlage wird, über eine Laufzeit von drei Jahren, eine Verfügbarkeit von 98 % angegeben.

2 Feuerungstechnologien

Ist keine passende Abwärme verfügbar, so werden konventionelle Methoden der Wärmebereitstellung benötigt. Auch wenn die Verbrennung eine jahrtausendealte Technik darstellt, gibt es im Bereich der Feuerungstechnik immer noch neue Entwicklungen. Innovationen im Bereich der Brenntechnik wurden bspw. durch CS Combustion Solutions GmbH, ein Tochterunternehmen der Unitherm Cemcon Feuerungsanlagen GmbH, vorgestellt. Die auf Sonderanfertigungen in der Feuerungstechnik spezialisierte Firma bietet technische Lösungen für die Verbrennung anspruchsvoller gasförmiger und/oder flüssiger Brennstoffe an. Der Schwerpunkt liegt insb. auf der thermischen Umsetzung von Sonder- und Abfallbrennstoffen. CS Combustion Solutions übernimmt Planung, Lieferung, Montage und die Inbetriebnahme von Kompletanlagen für die Verbrennung von Standard- und Sonderbrennstoffen.

Ein auf der ACHEMA besonders vorgestelltes Produkt ist die JULIP-Düse. Durch den Einsatz dieser Ultraschalldüse lässt sich, laut Herstellerangaben, der Bedarf an Zerstäubungsmedien um bis zu 50 % reduzieren. Die Tröpfchengröße kann dabei gegenüber konventionellen Ultraschallzerstäuberdüsen nahezu konstant gehalten werden. Der Medianwert der Tröpfchengröße (gemessen für einen Lastfall von 1500 kg h^{-1} Wasser und $220 \text{ m}_N^3 \text{ h}^{-1}$ Zerstäubungsluft) liegt bei $112 \mu\text{m}$ bei einer Größenverteilung, die bis etwa $250 \mu\text{m}$ reicht. Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit wird mit etwa 37 m s^{-1} angegeben. Besonders für die thermische Verwertung heizwertarmer Flüssigkeiten bietet die Technologie Potenziale. Neben Düsen für flüssige Brennstoffe bietet CS Combustion Solutions Produkte für die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe an. Für dieses Anwendungsfeld wird reklamiert, dass mit der automatisch geregelten Gaseindüsung VARIEX eine Lösung zur Verfügung steht, durch die der Regelbereich auf bis zu eine Breite von 1:40 erweitert werden kann. Mit statischen Systemen lässt sich hingegen nur ein maximaler Regelbereich von 1:10 realisieren. Das gilt hauptsächlich für explosionsgefährdete und dementsprechend technisch eingestufte Gase. Dies erlaubt es, Hilfsmedium

wie Luft oder Stickstoff einzusparen, das sonst zur Sicherstellung eines Mindestdurchsatzes benötigt wird (Abb. 3). Beide Systeme, sowohl die JULIP-Düse als auch die VARIEX-Lanze, sind von CS Combustion Solutions patentierte Systeme.

Die Vorgänge im Inneren von Brennkammern und Reaktoren lassen sich oft nur indirekt beobachten. Bei Verwendung von festen Brennstoffen in Kraftwerken erweist sich das mitunter als erheblicher Nachteil. Ungleichverteilungen von festem Brennstoff, die etwa zu ungleichmäßigem Abbrandverhalten und unerwünschten Verbrennungsprodukten führen können, lassen sich deshalb mitunter nur eingeschränkt feststellen. Auch Blockaden durch Agglomerationen von Partikeln und ähnliche Effekte lassen sich vielfach nur indirekt, bspw. über den Druckverlust, online beobachten. Eine Lösung hierfür wird von MSE Meili angeboten. Ihre Labasys[®]-Prozessendoskope erlauben die Beobachtung von Vorgängen wie Partikelverteilung, Partikelgrößenverteilung oder Partikelmorphologie in Wirbelschichten und anderen Reaktoren. Die Optik an der Spitze der Endoskope blickt durch ein Saphirfenster und Licht von einer LED wird über ein Glasfaserbündel übertragen. Die Spitze des Messsystems weist damit nur optische und keine elektronischen Komponenten auf, wodurch sich das Labasys[®] Process Scope Ex-geschützt betreiben lässt.

Die Systeme sind laut Herstellerangaben bis zu Drücken von 65 bar und (mit Kühlmantel) Temperaturen über $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ einsetzbar. Für die Kamerasysteme werden zeitliche Auflösungen bis zu 1000 fps angegeben. Für die örtliche Auflösung wird eine Obergrenze von aktuell 2 MP genannt. Die Systeme sind mittels einer doppelten Dichtungsbarriere so konstruiert, dass selbst bei einem Bruch des Saphirfensters Dichtheit nach außen gewährleistet ist. Aktuell wird das Prozessendoskop in der Polymerindustrie eingesetzt, es ist jedoch grundsätzlich für alle Prozesse geeignet, die bei großen Drücken und Temperaturen und explosionsgeschützt betrieben werden.

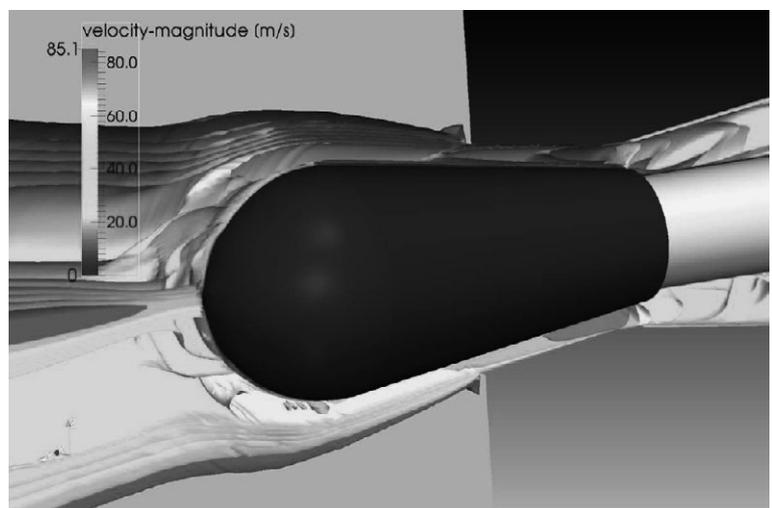


Abbildung 3. CFD-Simulation der Gasströmung in einer VARIEX Gaseindüsung.

Für die Verbrennung von Feststoffen ist sehr oft eine vor-herige Trocknung erforderlich. Einen Ansatz zur Trocknung bei dem zugleich Prozessdampf gewonnen werden kann, bietet die Firma Swedish Exergy AB (Göteborg, Schweden) an. Bei einem großen Teil der Trocknungsprozesse wird Wasser aus dem Trockengut in die Dampfphase überführt und von einem Luftstrom aufgenommen. Swedish Exergy verwendet eine Trocknungstechnologie, bei der überhitzter Dampf als Trocknungsmittel eingesetzt wird (Abb. 4). Der vereinigte Dampfstrom aus Trocknungsmittel und verdampfter Produktfeuchte bildet einen Sattdampfstrom, der sich als Heizdampf einsetzen lässt. Die Feuchtigkeit verdampft bei einem Druck von etwa 3 bis 5 bar. Dementsprechend ist es möglich, den entstehenden Dampf einer energetischen Nutzung zuzuführen. Dadurch lassen sich, nach Angaben von Swedish Exergy, bis 80 % der eingesetzten Energie der Trocknung zurückgewinnen.



Abbildung 4. ExergyPSSD (Dampftrockner mit überhitztem Dampf) für die Trocknung von Holzpellets.

Nach der Trocknung werden Trockengut und Dampf im Zyklon getrennt. Die Verweilzeit des Produkts im Dampftrockner beträgt typischerweise etwa 10 Sekunden. Der Nettoenergiebedarf wird für die Technologie mit $150 \text{ kWh}_{\text{th}}$ pro Tonne entfernten Wassers angegeben. Gegenüber den oft ca. $1000 \text{ kWh}_{\text{th}}$ pro Tonne, die in den meisten konventionellen Prozessen anfallen, bietet sich so das Potenzial für nennenswerte Energieeinsparungen. Da die Trocknung ohne Luft und damit sauerstofffrei arbeitet, vereinfacht sich die Absicherung gegen Feuer.

Die Dampftrockner lassen sich u. a. in der Produktion von Holzpellets, der Verarbeitung von Zellstoff oder der Trocknung von Klärschlamm einsetzen. Die Trocknung mit überhitztem Dampf bietet neben der Energieeffizienz noch eine Reihe weiterer Vorteile. So wird das Trockengut bei der Trocknung sterilisiert, was bei Klärschlämmen oder der Futtermittelherstellung von Vorteil ist. Des Weiteren wirkt sich der Aufbau in Form eines geschlossenen Dampfkreislaufs positiv auf die Prozesssicherheit aus. Das Risiko einer Kontamination des Trockenguts durch Kontakt mit dem Trocknungsmittel kann auf diese Weise deutlich gesenkt werden.

3 Power-to-Heat

Ein grundsätzlich sehr einfacher (und damit potenziell kostengünstiger) Weg zur Wärmebereitstellung ist die elektrische Beheizung. Die thermodynamisch gesehen zunächst einmal wenig naheliegende Umwandlung von elektrischer Energie in exergetisch niederwertige Wärme bietet, unter dem Schlagwort Power-to-Heat, die Option zur vergleichsweise kostengünstigen Aufnahme überschüssiger Strommengen. Auch in diesem Bereich gab es auf der ACHEMA wieder mehrere Firmen, die entsprechende Technologien vorstellten.

Zielparameter bei Power-to-Heat-Anwendungen sind hohe Temperaturen, Wartungsfreiheit und eine hohe Standzeit. Zur Optimierung dieser Parameter wurde durch Türk + Hillinger Elektrowärme ein innovatives Plattenheizsystem zur Lufterwärmung, das bei Bedarf auch Strahlungswärmeanteile im Bereich von $2\text{--}5 \mu\text{m}$ zur schnellen und gleichmäßigen Wärmeübertragung nutzt, entwickelt und auf der ACHEMA vorgestellt. Vor allem bei neuen Speicheransätzen mit Nutzung von nichtfluiden Speichermassen kann dieser Heizungstyp seine Vorteile im Hochtemperaturumfeld ausspielen. Je nach Projektanforderung können Heizungen bis in den Megawattbereich mit dieser Heiztechnologie kurzfristig modular ausgelegt und erstellt werden. Elektrische und konstruktive Elemente wie Hochspannungsfestigkeit, Oberflächenbelastung und Endtemperaturen werden projektspezifisch und auf den vorhandenen Bauraum angepasst nach Kundenanforderungen festgelegt. Durch modernste Produktionsanlagen und hauseigene Auslegungsoftware können Plattenheizsysteme kurzfristig realisiert und anschlussfertig geliefert werden. Weitere Anwendungsfelder des EPH-Systems reichen derzeit vom (Industrie-)Backofen bis zu äußerst kompakten Hochleistungsluftherzern.

Ein Anbieter für elektrische Heizsysteme ist Siekerkotte Elektrowärmetechnik. Eine Power-to-Heat-Anlage von Siekerkotte wurde u. a. im Münchener Fußballstadion installiert (Abb. 5). Die Anlage wird eingesetzt, um negative Sekundärleistung zur Netzstabilisierung zu erbringen. Die beiden bereits vorhandenen Gasbrenner bleiben weiterhin bestehen und übernehmen die Heizung, falls kein Bedarf an negativer Regelleistung besteht. Im Falle eines Ausfalls eines der Gasbrenner kann das elektrische Heizsystem allerdings mit seiner Leistung von 2 MW als Reserve einspringen. Das System ist aus acht Schaltgruppen zu jeweils 250 kW aufgebaut, die stufenlos regelbar sind. Die Steuerungstechnik kontrolliert dabei einen maximalen Stromfluss von 3,2 kA. Die Regelung wurde mit dem bestehenden, auf mehreren Regelkreisen basierenden System des Warmwasserkreislaufs synchronisiert, um ein stabiles Regelverhalten zu gewährleisten. Zweieinhalb Minuten nach der Installation war die Regelung so weit justiert, dass die Temperatur des Wassers den geforderten Wert mit $\pm 0.1 \text{ K}$ einhalten konnte. Die Einbringung der Anlage vor Ort erfolgte in nur zwei Tagen. Siekerkotte stellt daneben u. a. die elektrischen Einschraub-

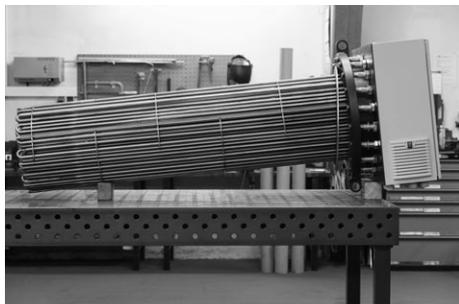


Abbildung 5. Elektrisches Heizelement von Siekerrkotte mit einer Leistung von 2 MW. © Siekerrkotte GmbH & Co. KG.

heizkörper für ein Power-to-Heat-Pilotprojekt in Werne her. Dabei werden 50 Privathaushalte mit einer Power-to-Heat-Anlage ausgestattet.

Nicht nur bei Power-to-Heat-Anwendungen ist es wichtig, die thermische Energie gegebenenfalls effizient speichern zu können. Vor allem die Speicherung von Hochtemperaturwärme ist aus energietechnischer Sicht interessant. Systeme zur Speicherung sensibler Wärme in Sand wurden durch die Firma Storasol GmbH vorgestellt. Bei thermischer Energiespeicherung in Schüttungen partikulärer Speichermedien muss zunächst ein Kompromiss bezüglich der Korngröße gefunden werden. Kleine Körner sind vorteilhaft für den Wärmetransport. Die Konsequenz kleiner Körner ist auf der anderen Seite jedoch ein hoher Druckverlust. Eine optimale Strömungsführung ist deshalb essenziell, um thermische Energiespeicher mit möglichst guter Temperaturcharakteristik der Wärmeentnahme betreiben zu können. Storasol verwendet hierzu ein System von parallel angeordneten Lagen des Speichermaterials, die von Luft als Wärmeträgermedium durchströmt werden. Durch eine günstige Strömungsführung ist es möglich, vergleichsweise große Oberflächen für den Wärmeaustausch, d. h. kleine Partikel, bei gleichzeitig vertretbarem Druckverlust zu gewährleisten. Die Systeme sind modular gestaltet. Dies zielt nicht nur darauf ab, eine einfache Skalierbarkeit zu gewährleisten. Ferner dienen die einzelnen Module auch dazu, eine separate Ladung und Entladung einzelner Teile des Gesamtspeichersystems zu erzielen, bei Bedarf auch mit unterschiedlichen Wärmeleistungen. Dadurch lässt sich die Wärmeentnahme gezielt an die Anforderungen anpassen. Die Storasol-Systeme sind damit in der Lage, starke Schwankungen der Wärmemengen und Temperaturen beim Beladen zu glätten.

Die Produkte der Firma Watttron, einer der Sieger des AICHEMA-Gründerpreises 2018, stellen keine dedizierte Energietechnologie dar, sind aus energetischer Sicht aber trotzdem durchaus interessant. Die Gründer haben ein modulares Heizsystem entwickelt, mit dem eine definierte zonale Erwärmung möglich ist. Einzelne kleine Heizkreise können dabei abhängig vom Bedarf des konkreten Anwendungsfalls individuell hinsichtlich der Temperatur geregelt werden. Das ermöglicht eine sehr präzise Erhitzung, die

z. B. in der Thermoumformung genutzt werden kann. Durch die neue Technologie kann nicht nur der Materialeinsatz deutlich reduziert werden. Es bietet sich auch die Möglichkeit, den Energiebedarf deutlich zu senken. Ein Effekt ist dabei, dass durch die zonale Erwärmung deutlich weniger Teile unnötig mit aufgewärmt werden müssen. Des Weiteren sind die Systeme innerhalb weniger Sekunden betriebsbereit. Dementsprechend lassen sich Heizkreise während kurzer Unterbrechungen im Produktionsprozess ausschalten. Für den Fall eines Joghurtbechers kalkuliert eine Modellrechnung von Watttron die Energieeinsparung exemplarisch auf etwa 30 %. Als weitere interessante Option wird die Möglichkeit genannt, den lokal erforderlichen Heizbedarf an eine Maschinensteuerung zu übermitteln. Dadurch ergeben sich Optionen für neue Arten der Prozesskontrolle.

4 Power-to-X

Deutlich aufwendiger, aber aufgrund der deutlich höherwertigen Produkte interessant, ist die Umwandlung von elektrischer Energie nicht in Wärme, sondern in Kraftstoffe oder Basischemikalien. Bei den Ausstellern in diesem Bereich fällt der noch immer sehr hohe Anteil von Forschungsprojekten auf. Nichtsdestotrotz ließ sich sowohl das Engagement größerer Firmen als auch einiger Start-ups, die entsprechende Technologien anbieten, beobachten.

Ein vergleichsweise junges Unternehmen aus dem Bereich der alternativen Kraftstoffe, das sich bereits bei der letzten AICHEMA vorgestellt hat, war auch dieses Mal wieder vertreten. Ineratec bietet klein- bis mittelskalige Gas-to-Liquid- und Power-to-Liquid-Anlagen basierend auf der Fischer-Tropsch-Synthese an. Mit leichter Modifikation sind diese allerdings genauso zur Methanolsynthese oder Methanisierung einsetzbar. Die Technologie basiert im Kern auf mikrostrukturierten Reaktoren, die mit einer innovativen Verdampfungskühlung ausgestattet sind. Dies erlaubt eine effiziente und sichere Durchführung von stark exothermen Reaktionen im kompakten Maßstab und kann z. B. in Containeranlagen eingesetzt werden. Ziel ist damit die dezentrale Produktion von alternativen Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen. Als Wasserstoffquelle wird in verschiedenen Projekten dabei die Elektrolyse von Wasser adressiert. Daneben sollen Anlagen zur Umsetzung von Methan in flüssige Kraftstoffe an Standorten mit überflüssigem CH_4 -Anfall dienen. Dadurch könnte ein Beitrag geleistet werden, dass bspw. Erdgas, das in geringen Mengen an Ölquellen anfällt, seltener abgefackelt wird, sondern eine Nutzung erfährt. Darüber hinaus soll die Technologie zur Verwertung von Bio-, Klär- oder Deponiegas angewendet werden. Nach einer Gasreinigung können diese Gase direkt den Anlagen zur chemischen Umwandlung zugeführt werden. Die Synthesegasgewinnung erfolgt im Fall der Konversion solcher Gase durch dampfgestützte, katalytische Partialoxidation. Ein weiterer Vorteil dieser Reaktoren ist,

dass sie nicht nur kompakt sind, sondern nach Angaben von Ineratec dynamisch und damit bei verschiedenen Lasten betrieben werden können. Kurze An- und Abfahrzeiten im Minutenbereich sowie ein lastflexibler Betrieb, bei dem die Leistung auf bis zu 30 % der Nennleistung reduziert wird, sind möglich. Eine Reihe von Anlagen wurde bereits an unterschiedlichen Standorten aufgebaut bzw. befindet sich gerade in der Aufbauphase.

Mit dem Energy Lab 2.0 errichten die Helmholtz-Zentren Karlsruher Institut für Technologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und Forschungszentrum Jülich derzeit eine großskalige Forschungsinfrastruktur für die Untersuchung drängender Fragen der Energiewende. Das Energy Lab 2.0 soll als Reallabor und Simulationsplattform die Untersuchung unterschiedlicher Komponenten von vernetzten Energienetzen in ihrem Zusammenspiel ermöglichen. Dabei geht es sowohl um die Architektur der Netze als auch um die Kopplung der einzelnen Energiesektoren Elektrizität, Wärme und chemische Energieträger. In dem derzeit am KIT errichteten Anlagenverbund des Energy Lab 2.0 werden in containerbasierten Anlagen ausgehend von Elektrolysewasserstoff und Kohlendioxid die Herstellung CO₂-neutraler Kraftstoffe über die Fischer-Tropsch-Synthese mit mikrostrukturierten Reaktoren und Methan über die Sabatier-Reaktion untersucht. Neben den verfahrenstechnischen Forschungsfragen wie bspw. der Kopplung von fluktuierendem erneuerbarem Strom mit den Power-to-X-Konversionsanlagen zu chemischen Energieträgern geht es um eine Reihe weiterer Fragen. Im Fokus der Untersuchungen im Energy Lab 2.0 am KIT stehen daneben die last- und brennstoffflexible Rückverstromung mittels Mikrogasturbinen. Weitere Themen sind die Speicherung elektrischer Energie in einem optimierten Lithium-Ionen-Großspeicher und die Entwicklung intelligenter Regelstrategien zur Kopplung der unterschiedlichen Energieströme in einem dezentralen Smart-Grid.

Als Teil der CO₂Plus-Förderausschreibung untersuchen Siemens und Evonik zusammen mit Wissenschaftlern an der TU Berlin, der Ruhr-Universität Bochum und dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg im Projekt eEthylen, wie sich Kohlenstoffdioxid elektrochemisch zu Ethylen umsetzen lässt. Ethylen wäre ein sehr interessantes Produkt, da es als Ausgangsstoff für die Synthese verschiedener Kunststoffe dient. In einer direkten, einstufigen Elektrolyse wird Elektrizität genutzt, um Ethylen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser zu synthetisieren. Der Fokus des Projektes liegt auf den Elektrokatalysatoren. Die Herausforderung besteht dabei vor allem darin, geeignete, stabile kupferbasierte Elektroden zu entwickeln, die die Elektronen nicht auf das Wasser übertragen und so Wasserstoff bilden, sondern mit hohem faradayschem Wirkungsgrad das Zielprodukt bilden.

In einem weiteren Projekt namens Rheticus arbeiten Siemens und Evonik an einem zweistufigen Verfahren zur Gewinnung von Wertstoffen aus CO₂. Der erste Schritt ist dabei die elektrolytische Konversion von Kohlenstoffdioxid

in Kohlenstoffmonoxid. Siemens betreibt dazu aktuell Versuchsaufbauten, um die Elektrolysezellen und Gasdifusionselektroden zu testen und zu optimieren. Eingesetzt werden silberbasierte Elektroden wie sie auch in der Chlor-Alkali-Elektrolyse bei Covestro verwendet werden. Stromdichten von bis zu 300 mA cm⁻² wurden dabei über eine Dauer von mehr als 1200 Stunden demonstriert [2]. Das in der Elektrolyse entstehende CO-reiche Gas soll in einem zweiten Schritt durch ein Fermentationsverfahren von Mikroorganismen zu höheren Alkoholen wie Butanol oder Hexanol umgesetzt werden. Diese Alkohole können bspw. als Ausgangsstoffe für Spezialkunststoffe und Nahrungsergänzungsmittel dienen. Ziel des Konsortiums ist es, die Technologie bis 2021 aus dem Labormaßstab in eine technische Versuchsanlage mit einer Kapazität von 10 bis 20 Tonnen pro Jahr zu überführen.

Zu einem limitierenden Faktor für die Gewinnung von synthetischen Kraftstoffen und Chemikalien aus CO₂ kann die Verfügbarkeit desselben werden. Eine denkbare und potenziell unerschöpfliche Quelle für CO₂ wäre die Luft. Die Konzentration in der Atmosphäre von etwa 400 ppm mag aus meteorologischer Sicht zwar problematisch hoch sein, aus trenntechnischer Sicht ist der Wert hingegen sehr niedrig. Entsprechend groß sind die Herausforderungen für eine energieeffiziente Abtrennung aus der Luft. Im Rahmen des Projekts CORAL, das vom BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme „CO₂Plus – Stoffliche Nutzung von CO₂“ gefördert wird, adressieren Forscher des Zentrums für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung (ZSW) und der Universität Stuttgart (IPOC) sowie am Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), diese Fragestellung. Projektziel ist die Entwicklung eines Verfahrens mit minimalem elektrischem Energiebedarf, wobei vorrangig Abwärme aus anderen Prozessschritten wie der Elektrolyse und der Kohlenwasserstoffsynthese genutzt werden soll. Konkurrierende Vorhaben fokussieren hierzu feststoffgebundene Aminverbindungen. Die ZSW-Forscher arbeiten an einem Gaswäscheprozess mit einer wässrigen Aminlösung. Erste Voruntersuchungen deuten darauf hin, dass der Energiebedarf nicht größer ist als bei den konkurrierenden Verfahren. Durch die Übertragung in die flüssige Phase ergeben sich erhebliche Vorteile in der Handhabung und Prozessführung gegenüber der Adsorption auf festen Trägern.

Als kommerzieller Anbieter von Direct-Air-Capture-Systemen stellte sich die Firma Climeworks auf der AICHEMA vor. Die CO₂-Filtertechnologie basiert auf einem Adsorptionsprozess mit Regeneration durch eine Temperaturerhöhung auf ca. 100 °C. Als Energiebedarf zur Abtrennung von 1 Tonne CO₂ aus der Atmosphäre werden 1500–2000 kWh thermische und 300–450 kWh elektrische Energie (primär für Ventilatoren zur Förderung des Luftstroms) genannt. Für eine Anlage, die etwa 135 kg CO₂ pro Tag mit einem Kollektor abtrennen kann, wird ein Footprint von 20 m² genannt. Im Scale-up der Kapazität durch Erhöhung der Anzahl an Kollektoren lässt sich sowohl der Flächenbedarf

als auch der Energiebedarf laut Herstellerangaben deutlich reduzieren.

Im Rahmen des Projektes MIKE (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Initiative „Stoffliche Nutzung von CO₂ zur Verbreiterung der Rohstoffbasis“) beschäftigt sich die Arbeitsgruppe Industrielle Biotechnologie des DECHEMA-Forschungsinstituts mit der mikrobiellen Elektrosynthese von Methan. Ziel ist es dabei, Kohlenstoffdioxid aus Rohbiogas nicht mehr abtrennen zu müssen, sondern es ebenfalls in Methan zu konvertieren und die effektive Biogasausbeute so zu erhöhen. Dabei soll nicht der klassische Sabatier-Prozess verwendet werden, sondern ein elektrochemisches Verfahren, bei dem Mikroorganismen die Synthese übernehmen. Elektroaktive, methanogene Archaeen sollen dabei eingesetzt werden. Statt chemischer Elektronendonatoren können diese Mikroorganismen die von einer Elektrode angebotenen Elektronen direkt verwenden. Das Verfahren stellt eine Art Umkehrung der mikrobiellen Brennstoffzelle dar. Die Arbeitselektrode in einer H-Zelle wird dabei mit einem Potenzial von -1 V (relativ zu einer Ag/AgCl-Elektrode) polarisiert. Die Elektronenausbeute bei diesem Verfahren wird mit etwa 80 % angegeben. Die erzielte Stromdichte auf der Elektrode erreicht in der Spitze etwa $0,9\text{ mA cm}^{-1}$. In diesen Versuchen wurde ein Methanococcus-Stamm verwendet [3].

5 Wasserstoff

Ein wesentlicher Bestandteil der meisten Power-to-X-Technologien ist der Wasserstoff. Auch zur Herstellung von Wasserstoff und seiner Speicherung gab es auf der ACHEMA wieder einige Beiträge. Wasserelektrolysesysteme wurden unter anderem von ThalesNano Energy vorgestellt. Die angebotenen Apparate sollen Wasserstoff bei einem Druck von bis zu 100 bar liefern. Die Kompression erfolgt elektrochemisch. Das heißt, dass das Wasser bei Umgebungsdruck zugeführt wird und über die Membran hinweg durch die elektrische Spannung auf erhöhten Druck gebracht wird. Die maximale Wasserstoffflussrate wird mit $1\text{ L}_N\text{ min}^{-1}$ angegeben; für die Reinheit wird ein Wert von 99,99 % genannt. Durch die geringen Abmessungen von deutlich unter einem halben Meter in jeder Ausdehnung bieten sich die Geräte zum Einsatz direkt im Labor an.

Kommerzialisierungen der LOHC-Technologie wurden durch die Hydrogenious Technologies GmbH aus Erlangen vorgestellt. LOHC (*liquid organic hydrogen carrier*) ist eine Methode zur Speicherung von Wasserstoff durch reversible Hydrierung von aromatischen Trägersubstanzen. Die Reaktionen sowohl der Wasserstoffaufnahme als auch der Abgabe erfolgen katalytisch. Bei der Wasserstoffaufnahme geschieht dies bei einem Druck von ca. 30 bar. Bei der exothermen Reaktion wird Wärme freigesetzt (etwa $9\text{ kWh}_{\text{th}}\text{ kg}_{\text{H}_2}^{-1}$).

Die Wasserstofffreisetzung geschieht bei Umgebungsdruck (oder leicht darüber) und erhöhten Temperaturen von ca. 300 °C. Die gegenwärtig von Hydrogenious verwendete Trägersubstanz ist Dibenzyltoluol. Die hydrierte Form, Perhydrodibenzyltoluol, speichert neun Moleküle Wasserstoff pro Molekül und kann bei Umgebungsbedingungen gelagert werden. Die volumetrische Speicherdichte für den Wasserstoff kann auf diese Weise deutlich erhöht werden.

Die gegenwärtig angebotenen Systeme zur Wasserstoffaufnahme mit einer Kapazität beginnend bei $10\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$ lassen sich in einem 10-Fuß-Standardcontainer unterbringen. Größere Systeme, mit einer Kapazität von bis zu $150\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$, können in 20-Fuß-Containern installiert werden. Bei größerem Speicherbedarf sind freistehende Anlagen mit einem Speichervermögen von 500 bis über $5000\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$ möglich. Freisetzungseinheiten werden ebenfalls als Containersysteme angeboten, mit Kapazitäten von $10\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$ in einem 20-Fuß-Container über $150\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$ in einem 30-Fuß-Container bis hin zu $250\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$ in einem 40-Fuß-Container. Der Wasserstoff erreicht 4.0 als Reinheit. Bei Bedarf bietet Hydrogenious des Weiteren ein Upgrade an mit dem 5.0-Wasserstoff bereitgestellt werden kann.

Anfang 2018 ging eine erste Anlage bei der United Hydrogen Group in Tennessee (USA), in Betrieb (Abb. 6). Die Funktion dieses Systems ist die Erhöhung des Lieferradius von Wasserstoffproduzenten. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff, selbst in komprimierter Form, kann der Transport bisher sinnvoll nur über begrenzte Distanzen erfolgen. Der Kreis potenzieller Abnehmer für den Wasserstoff aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist aus diesem Grund stark eingeschränkt. Die LOHC-Technologie erlaubt eine deutliche Erhöhung der Speicherdichte. Außerdem ist das Perhydrodibenzyltoluol schwer entflammbar und nicht als Gefahrgut klassifiziert. So soll in herkömmlicher Kraftstoffinfrastruktur eine sichere und effiziente Versorgung von weiter entfernten Abnehmern ermöglicht werden. Aktuell befinden sich darüber hinaus Anlagen im Engineering, die zur Versorgung von Wasserstofftankstellen dienen sollen. Die Auslieferung einer ersten Anlage nach China ist für Anfang 2019 geplant. Die Ausrüstung einer Wasserstofftankstelle in Erlangen mit einer entsprechenden Freisetzungseinheit ist im Laufe des kommenden Jahres vorgesehen.



Abbildung 6. Inbetriebnahme der LOHC-Anlage bei der United Hydrogen Group (Tennessee, USA).
© Hydrogenious Technologies GmbH.

6 Bioenergie

Teilweise mit den Wasserstoff- und Power-to-X-Technologien verwandt, aber an etlichen Stellen doch wieder deutlich unterschiedlich, waren viele der vorgestellten Bioenergie-themen. Im bioliq[®]-Projekt des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) werden aus trockener, lignozellulose-reicher Restbiomasse synthetische Kraftstoffe hergestellt. Ausgangsstoffe können bspw. Waldrestholz oder Stroh aus der Landwirtschaft sein. Durch die Pyrolyse im ersten Verfahrensschritt findet eine Energieverdichtung statt – aus der Biomasse wird ein Rohöl-ähnliches Produkt, der sog. Biosyncrude. Die thermochemische Konversion der Biomasse mittels Pyrolyse erfolgt bei 500 °C, nahezu atmosphärischem Druck und unter Luftausschluss. Dabei entstehen, abhängig vom Einsatzstoff und den Betriebsbedingungen, unterschiedliche Anteile an Koks, wässrigem und organischem Kondensat sowie ein Anteil Pyrolysegas. Durch Verbrennung kann der Energieinhalt des Pyrolysegas im Prozess weiter genutzt werden und damit zur Energieeffizienz des Gesamtprozesses beitragen. In der Pilotanlage können durch die Pyrolyse bis zu 500 kg h⁻¹ Biomasse umgesetzt werden. Anschließend werden Pyrolyseöl und -koks zu einer fließfähigen, pumpbaren Flüssigkeit gemischt. Diese Mischung, der Biosyncrude, wird dann im Flugstromvergaser mit technischem Sauerstoff zerstäubt und bei über 1200 °C zu Rohsynthesegas umgesetzt. Der Vergasertyp des Flugstromvergasers wurde gewählt, da er den eingesetzten aschereichen Ausgangsbio-massen gegenüber sehr tolerant ist, aber vor allem, da er nahezu teerfreies, methanarmes Synthesegas liefert. Der Flugstromvergaser in der bioliq[®]-Pilotanlage ist für einen Durchsatz von 1000 kg h⁻¹ ausgelegt. In der Heißgasreinigung wird das Synthesegas von Störstoffen und Katalysatorgiften gereinigt. In der darauffolgenden Kraftstoffsynthese wird das Synthesegas zunächst katalytisch in Dimethylether (DME) umgewandelt. Anschließend wird der DME an einem weiteren Katalysator zu Rohbenzin umgewandelt. Die Aufbereitung des Rohbensins zum Kraftstoff erfolgt destillativ in der bioliq[®]-Anlage. Das Karlsruher bioliq-Verfahren umfasst als integrative Prozesskette insgesamt vier Prozessschritte.

Ein weiteres BMBF-gefördertes Projekt zur Gewinnung von Chemikalien aus Biomasse wurde vom KIT vorgestellt. Verschiedene Forschungsinstitutionen und Industriepartner arbeiten im Verbund OptiMeOH zusammen, um sowohl den Kohlenstoff in Biomasse als auch den in Kohlenstoffdioxid in Form von Methanol als Rohstoff nutzbar zu machen. Neben dem KIT gehören zu diesem Verbund Forscher der TU Kaiserslautern, der Universität Stuttgart und der DVGW-Forschungsstelle sowie mehrere Industriepartner. Im Fokus der Arbeiten stehen u. a. die Biogaserzeugung durch Druckfermentation (Vergärung von Biomasse bei einem Druck von mindestens 30 bar), ein neuartiges Reaktorkonzept zur Methanolsynthese und ein Verfahren zur Aufbereitung von Industriegasen durch Gaswäsche mit ionischen Flüssigkeiten als Absorptionsmittel. Im Rahmen

einer Machbarkeitsstudie soll die Einbindung der Technologie in zwei unterschiedliche Industriestandorte beurteilt werden. Diese repräsentieren sowohl einen großen Industriepark als auch eine kleine, dezentrale Anlage.

Um die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen für die Zeit nach dem EEG kümmert sich unter anderem das Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) in enger Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig. Das Ziel ist es, aus regional anfallender Biomasse neben dem Biomethan weitere Wertstoffe zu gewinnen. In den ersten Schritten des Biogasprozesses werden verschiedene kurzkettige Carbon-säuren gebildet. Diese spielen eine wichtige Rolle bei der anschließenden Methanbildung. Als chemische Grundstoffe sind allerdings eher mittel- und langkettige Fettsäuren interessant. Der entwickelte Prozess liefert vor allem Capron- und Caprylsäure. Diese können sehr vielseitig eingesetzt werden, z. B. als Lebensmittelzusätze, in Biokunststoffen oder als Schmier- sowie Reinigungsmitteladditive. Die Bedingungen für den anaeroben, mikrobiellen Prozess werden so modifiziert, dass eine erhöhte Ausbeute an den mittelkettigen Fettsäuren erreicht wird. Durch eine Fest/Flüssig-Trennung wird der Fermentationsbrühe anschließend die flüssige Phase entzogen, aus der mithilfe eines hydrophoben Lösungsmittels die Fettsäuren extrahiert werden. Kurzkettigere Säuren, die einen geringeren Marktwert besitzen, aber für die anschließende Methanbildung essenziell sind, verbleiben aufgrund ihrer höheren Polarität in der Ausgangsflüssigkeit und können weiterhin zu Methan vergoren werden. Bestehende zweistufige Biogasanlagen könnten damit eine Wertschöpfung nicht nur aus dem (noch EEG-geförderten) Methan ziehen, sondern zusätzlich aus der Produktion von Basischemikalien. Die Methanausbeute verringert sich nach Angaben des DBFZ durch die vorgelagerte Gewinnung der mittelkettigen Fettsäuren nur um etwa 10 %.

Zu den Herausforderungen auf dem Weg von der Forschung zur tatsächlich großtechnisch realisierten Technologie sprach David Edwards von der Firma Zeton. In einem Vortrag über das Scale-up von Bioenergie-technologien stellte er anhand verschiedener Beispiele die „Täler des Todes“ dar, die sich auf diesem Weg ergeben. Er betonte dabei besonders die Wichtigkeit der einzelnen Scale-up-Schritte. Die Hindernisse auf dem Weg zur marktreifen Technologie würden beginnend beim Schritt aus dem Labor in den Pilotmaßstab über den Schritt vom Pilot- in den Demonstrationsmaßstab bis zum letzten Schritt in die Kommerzialisierung immer größer. Die Folgen des Scheiterns in einem dieser „Täler des Todes“ – nicht nur in Form von Geld, sondern auch bspw. in Form von Reputation und persönlichen Karrieren – nehmen dabei immer weiter zu. Edwards warnte daher eindringlich davor, einzelne Schritte überspringen zu wollen und bspw. direkt vom Pilotmaßstab in die Kommerzialisierung zu gehen. Die Empfehlung war hingegen viel mehr kleine Schritte im Hinblick auf den Durchsatz der Anlagen zu gehen. Die Schrittweite sollte beim Scale-up von Bioenergie-technologien deutlich kleiner

gewählt werden als bei konventionellen chemischen Prozessen bei denen nur Fluide gehandhabt werden. Statt einer Schrittweite von 100 bis 1000 wird daher eine Schrittweite von lediglich 10 bis maximal 100 empfohlen.

Als weitere Mahnung erinnerte Edwards daran, zusätzliche Zeit als Puffer bei der Inbetriebnahme von Bioenergieanlagen einzuplanen. Insbesondere die Zufuhr von Feststoffen und deren Handhabung verursachen des Öfteren Probleme, die zu Verzögerungen im Projektplan führen. Als Erfahrungswert dafür, wie sehr die tatsächliche Inbetriebnahmedauer die geplante übersteigt, nannte er für Flüssig-/Gas-Prozesse etwa einen Faktor 1,5. Bei der Verarbeitung von Feststoffen stiege dieser Wert auf etwa einen Faktor 2,5 an. Werden feste, biogene Rohstoffe verarbeitet, dann könne sogar ein Faktor deutlich oberhalb von 3 zwischen geplanter und tatsächlicher Inbetriebnahmedauer liegen. Bei der Planung von Bioenergie-technologien sollten deshalb auf jeden Fall entsprechende Puffer eingeplant werden. Des Weiteren einkalkuliert werden sollte eine deutlich geringere Produktionskapazität in der Anfangsphase als ursprünglich geplant. Erfahrungsgemäß sei damit zu rechnen, dass der volle Durchsatz erst erreicht werden kann, wenn ein gewisses Maß von Betriebserfahrung mit dem konkreten Prozess tatsächlich erworben wurde. Auch dieser Effekt sei bei biogenen Feststoffen als Ausgangsmaterial deutlich stärker ausgeprägt.

Als Maßnahmen zur Reduktion von Risiken schlug Edwards daher vor allem intensivere Tests, besonders während der Auslegungsphase, vor. Vor allem bei Systemen, die verschiedene Materialien und Feststoffe prozessieren müssen, sei dies essenziell. Der Fokus von Pilotierungs- und Testaktivitäten sollte auf diesen besonders kritischen Elementen liegen. Ein wichtiger Faktor sei daneben eine personelle Kontinuität beim Weg durch die einzelnen Entwicklungsschritte.

7 Energieeffizienz von Prozessen

Ein weiteres vom BMBF gefördertes Projekt, das auf der AICHEMA vorgestellt wurde, ist SynErgie. Im Rahmen dieses Kopernikus-Projekts erforscht Fraunhofer IPA, wie Produktionsprozesse mit fluktuierenden Energiequellen synchronisiert werden können. Zusammen mit etwa 100 Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft wollen die Wissenschaftler herausfinden, wie sich technische Prozesse und Betriebsabläufe so gestalten lassen, dass die Energieabnahme an das Angebot angepasst werden kann. Sie entwickeln dafür Technologien und Maßnahmen und darüber hinaus eine entsprechende IT-Infrastruktur. Damit würden die Unternehmen ihre Rolle flexibel ändern können – entweder sind sie Energielieferant oder -kunde. Das SynErgie-Projekt will die Grundlagen dafür schaffen, die Industrie so weit zu flexibilisieren, dass sie in einer Art erweitertem Smart-Grid sinnvoll agieren kann. Ein großes Problem ist dabei jedoch die Finanzierung der Abschrei-

bungen. Eine Anlage, die nur bei Überschüssen im Strommarkt läuft, erzielt nur eine geringere Produktion. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist so oftmals kaum darstellbar. SynErgie untersucht deshalb Wege, wie ein flexibler Betrieb wirtschaftlich möglich ist. Ein interessanter Absatzpunkt hierfür können Anlagen aus der Aluminiumproduktion sein. Die metallische Schmelze enthält eine große Menge sensibler Wärme. Diese kann dementsprechend als thermischer Energiespeicher eingesetzt werden. Die gespeicherte thermische Energie kann indirekt genutzt werden, um bei hohen Strompreisen kurzfristig mit einem geringeren Bedarf an Leistung auszukommen. Ein Schwerpunkt von Fraunhofer IPA liegt auf der Automobilindustrie mit ihren Zulieferern. Die Potenziale zur Flexibilisierung sollen für diese (und andere) Branche(n) identifiziert und gehoben werden. Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen von SynErgie in der Modellregion Augsburg beleuchtet wird, sind Fragen der sozialen Akzeptanz der entwickelten Technologien zur Flexibilisierung des Strommarktes.

Zur Verbesserung u. a. der Energieeffizienz von Systemen wurden durch Siemens *control performance analytics* (CPA) vorgestellt. Laut Aussage von Siemens wird etwa die Hälfte aller Regelkreise heutzutage nicht optimal betrieben. Die vorgeschlagene Lösung ist eine automatisierte Regleranalyse. Durch einen cloudbasierten Service lässt sich die Regelung von Prozessen nicht nur sehr viel schneller als bei manueller Einstellung realisieren, sondern neben einer höheren Produktqualität können auch ein geringerer Ressourcenbedarf und damit Energieeinsparungen in der Prozessindustrie erreicht werden. Mittels der bei der CPA gewonnenen Prozessdaten werde eine zusätzliche Transparenz über das Verfahren gewonnen. Durch eine langfristige Datenverfügbarkeit sind Optimierungsergebnisse über einen langen Zeitraum quantifizierbar.

8 Fazit

Thermische Energie spielte auf der diesjährigen AICHEMA im Bereich der Energie eine bemerkenswert große Rolle. Verschiedene Formen der Nutzung von Wärme wie auch ihrer Bereitstellung wurden in den Beiträgen verschiedener Firmen behandelt. Bei den ebenfalls stark vertretenen Power-to-X-Technologien fällt der nach wie vor hohe Anteil von Forschungsinstitutionen unter den Ausstellern auf. Nichtsdestotrotz lassen sich aber auch hier sich verstärkende Aktivitäten in der Kommerzialisierung beobachten.

Literatur

- [1] D. Olsen, P. Liem, Y. Abdelouadoud, D. Wellig, *Chem. Ing. Tech.* **2017**, *89* (5), 598 – 606.
- [2] T. Haas, R. Krause, R. Weber, M. Demler, G. Schmid, *Nat. Catal.* **2018**, *1* (1), 32 – 39.
- [3] F. Mayer, F. Enzmann, A. Martinez Lopez, D. Holtmann, *BIOspektrum* **2017**, *23* (4), 471 – 473.