

Mit Energie in die Zukunft

Das Zentrum für Energietechnik



Herzlich Willkommen!

Unser Zentrum für Energietechnik, kurz: ZET, hat sich in den vergangenen Jahren als der erste Ansprechpartner der Universität Bayreuth für Energie-Fragen entwickelt.

Jetzt, im Sommer 2018, ist ein besonderer Zeitpunkt erreicht: die Zusammenführung der energietechnischen Gruppen und Projekte in ein eigenes neues Gebäude. Dies erleichtert es allen am ZET beteiligten Lehrstühlen, noch enger zusammenzuarbeiten und gemeinsame Key-Labs zu nutzen.

Dieser Meilenstein ist Anlass genug, unsere vielfältige Kompetenz und Tätigkeit anhand ausgewählter Beispiele in dieser Broschüre darzustellen.

Viel Anregung beim Lesen wünscht



Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann
Direktor des ZET

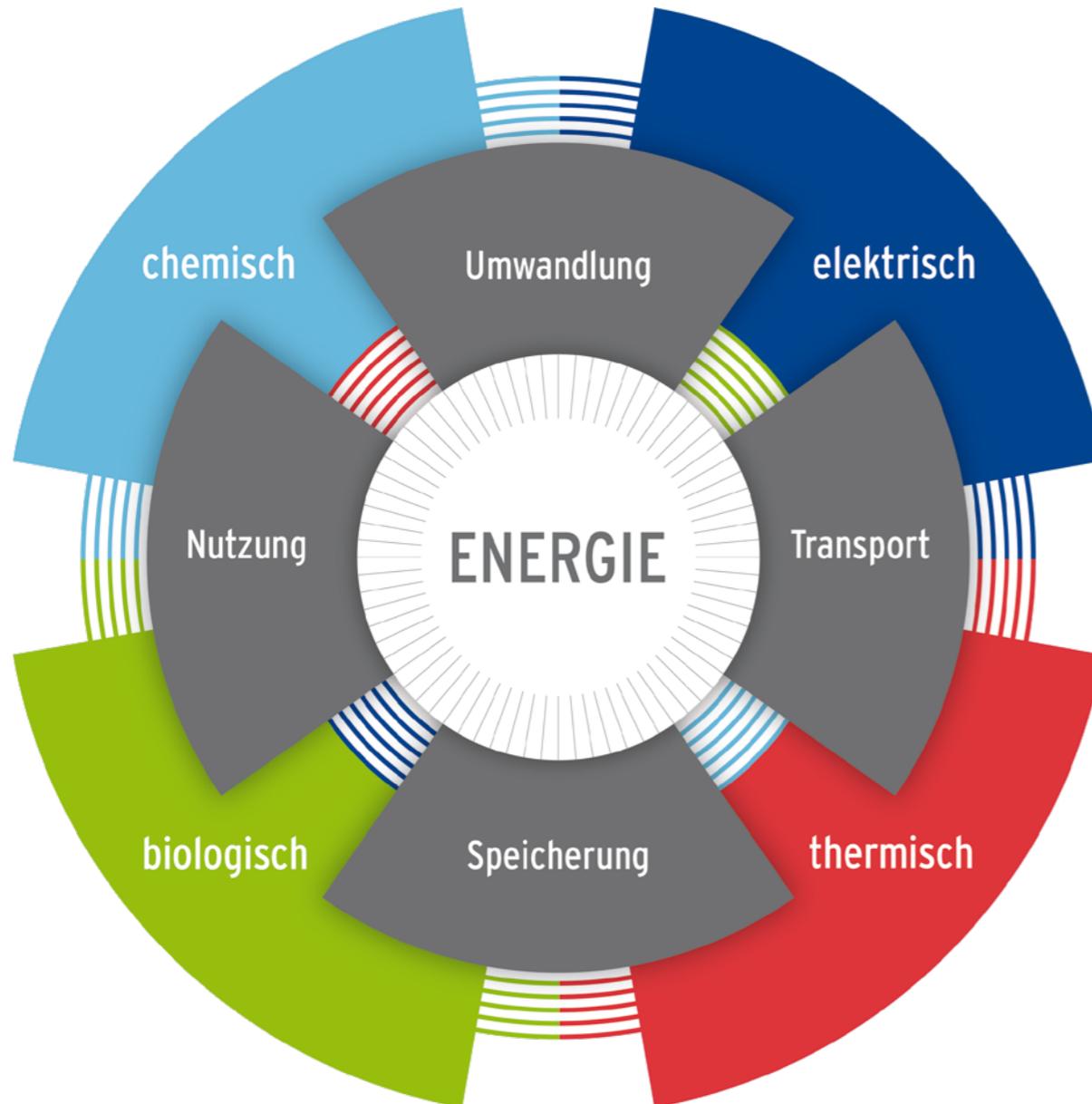


Inhaltsverzeichnis

| | | | |
|---|----|---|----|
| <i>Energie – eine Herausforderung für alle</i> | 5 | <i>Renaissance der elektrischen Raumheizung</i> | 28 |
| <i>Das Zentrum für Energietechnik</i> | 6 | <i>Elektrische Energie aus Gebäudevibrationen</i> | 30 |
| <i>Graduiertenkolleg Energieautarke Gebäude</i> | 9 | <i>Ökostrom trotz Windflaute und Wolkentepich?</i> | 32 |
| <i>Eine neue Heimat für das ZET</i> | 11 | <i>Das Treibhausgas CO₂ als Rohstoff?</i> | 34 |
| <i>Kompakte Wärmespeicher mit hoher Leistung</i> | 12 | <i>Material- und Prozessentwicklung für die Brennstoffzelle</i> | 36 |
| <i>Neue Wege zur dezentralen Stromerzeugung</i> | 14 | <i>Thermoelektrische Generatoren zur Nutzung von Abwärme</i> | 38 |
| <i>Energieversorgung von Krankenhäusern</i> | 16 | <i>Klares Wasser – reines Öl</i> | 40 |
| <i>Effiziente Energiewandler in DC- und AC-Netzen</i> | 18 | <i>Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe als chemische Energiespeicher</i> | 42 |
| <i>Neue Werkstoffe für Batterien</i> | 20 | <i>Energie mittels Biologie: Mehr als nur Strom</i> | 44 |
| <i>Werkstoffe für energieeffiziente Gebäude</i> | 22 | <i>FOR10'000: Power aus der Biotonne</i> | 46 |
| <i>Effiziente und zuverlässige dezentrale Energieversorgung</i> | 24 | <i>Bildnachweise und Quellenverzeichnis</i> | 50 |
| <i>Elektrochemische Speicher und Wandler für die Energiewende</i> | 26 | | |

Energie – eine Herausforderung für alle

Gebündelte Expertise im Zentrum für Energietechnik



Eine verlässliche, bezahlbare und umweltschonende Energieversorgung, dies zählt zu den großen Herausforderungen unserer Zeit. Eine einzige Lösung hierfür ist nicht in Sicht, vielmehr müssen verschiedene Energieformen intelligent miteinander vernetzt werden.

An der Universität Bayreuth werden vielversprechende Ansätze erforscht, entwickelt und erprobt. Um die energietechnische Aktivitäten in der Fakultät für Ingenieurwissenschaften besser zu bündeln, enger zu vernetzen und wirksamer nach außen zu präsentieren, wurde im Sommer 2012 das Zentrum für Energietechnik, kurz: ZET, gegründet. Heute steuern acht ingenieurwissenschaftliche Lehrstühle ihre Expertise bei.

Das ZET verfolgt dabei einen umfassenden Ansatz hinsichtlich der Formen der Energie (thermisch, elektrisch, chemisch und biologisch) und ihrer Behandlung (Umwandlung, Transport, Speicherung und Nutzung).

Im Schwerpunkt „Verwertung ungenutzter Energieströme“ werden Lösungen erarbeitet, um Energie effizienter als bisher zu nutzen. Ein Beispiel hierfür ist die bei Industrieprozessen oder auch in der Solarthermie anfallende Abwärme, die man zeitlich speichern und bei Bedarf räumlich transportieren oder zunächst in elektrische Energie umwandeln kann.

Das ZET trägt wesentlich zum Profildfeld „Energieforschung und Energietechnologie“ bei, das in der Universität Bayreuth einen fakultätsübergreifenden Forschungsschwerpunkt bildet und weiter ausgebaut wird.

In der TechnologieAllianzOberfranken (TAO) repräsentiert das ZET die wichtige Themensäule „Energie“. Im Mittelpunkt des TAO-Graduiertenkollegs „Energieautarke Gebäude“ steht die ganzheitliche Gestaltung von möglichst energieautarken Gebäuden im ländlichen Raum am Beispiel der Region Oberfranken, wobei besonders erneuerbare und dezentrale Energien gewünscht sind.

Das ZET ist Partner interessierter Unternehmen und zugleich mit zahlreichen anderen FuE-Einrichtungen vernetzt. In ihm finden Unternehmen, Kommunen und andere Interessenten eine zentrale Anlaufstelle für Energie-Fragen aller Art.

Das Angebot des ZET umfasst

- Projekte der anwendungsnahen Grundlagenforschung,
- konkrete Studien und Bewertungen sowie
- die Entwicklung energietechnisch relevanter Produkte und Verfahren.

Das Zentrum für Energietechnik

Beteiligte Lehrstühle und Lehrstuhlinhaber

Das ZET ist eine offizielle Forschungseinrichtung der Universität Bayreuth. Derzeit sind acht Lehrstuhlinhaber der Fakultät für Ingenieurwissenschaften seine Mitglieder. Das Zentrum leitet ein Vorstand, der aus dem Direktor und zwei Stellvertretern gebildet wird. Der Geschäftsführer unterstützt die Mitglieder und koordiniert die Umsetzung der Aktivitäten.

Direktor

Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse



Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran
Lehrstuhl für Mechatronik



Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos
Lehrstuhl für Funktionsmaterialien



Stellvertretender Direktor

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer
Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik



Prof. Dr.-Ing. Michael A. Danzer
Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme



Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD



Geschäftsführer

Dr.-Ing. Florian Heberle
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse



Stellvertretender Direktor

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess
Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik



Prof. Dr. Ruth Freitag
Lehrstuhl für Bioprozesstechnik



Graduiertenkolleg Energieautarke Gebäude

Das ZET in der TechnologieAllianzOberfranken

Die konventionelle Versorgung von Wohnhäusern ist noch immer abhängig von fossilen Energieträgern. Der Strom wird dabei aus dem Netz bezogen und wird zu einem überwiegenden Teil in Gas-, Kohle- und Atomkraftwerken erzeugt. Die Wärmeversorgung basiert meist auf gebäudeinternen Gas-, Öl- oder Holzbrennern. Wie sich Gebäude und Kommunen der Zukunft mehr und mehr von dieser traditionellen Versorgungsstruktur lösen können, erforschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ZET derzeit auch im Rahmen der TechnologieAllianzOberfranken (TAO).

Die TechnologieAllianzOberfranken ist ein Verbund in Oberfranken, der die Synergieeffekte der Universitäten Bamberg und Bayreuth sowie der Hochschulen für angewandte Wissenschaften Coburg und Hof auf Lehr- und Forschungsebene nutzt und weiter ausbaut. Die Themengebiete „Energieeffiziente Gebäude“ sowie „Umwandlung, Verteilung und Speicherung regenerativer Energien“ sind dabei schon seit vielen Jahren fest in den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einiger Professuren verankert. Beide Themengebiete weisen eine hohe Verwandtschaft auf und waren 2015 die thematische Grundlage für die Einrichtung des Graduiertenkollegs „Energieautarke Gebäude“, welches von TAO durch umfangreiche Personal- und Sachmittel finanziert wird.

Im Mittelpunkt steht die ganzheitliche Gestaltung von im Idealfall energieautarken Gebäuden im ländlichen Raum am Beispiel der Region Oberfranken insbesondere durch regenerative (dezentrale) Energie. Die beiden Leitgedanken sind dabei

- die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren und Informatikern (auch) mit Geisteswissenschaftlern sowie
- das Zusammenbringen der sich ergänzenden wissenschaftlichen Expertisen der Universitäten Bayreuth und Bamberg und der anwendungsbezogenen Forschung und Entwicklung der Hochschulen Coburg und Hof.

Die bereits gute Kooperation der an TAO beteiligten Universitäten und Hochschulen in der Forschung wird damit strategisch ausgebaut. Derzeit erhalten 14 aus TAO finanzierte und 6 weitere assoziierte Doktorandinnen und Doktoranden einen attraktiven Rahmen, der es ermöglicht, gemeinsam an einem aktuellen TAO-Forschungsthema zu arbeiten. Die überwiegende Mehrheit promoviert dabei direkt am ZET oder in Kooperation mit dem ZET an einer der beiden Hochschulen. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess und Dr.-Ing. Florian Heberle vom ZET fungieren zudem als Sprecher und Koordinator des Graduiertenkollegs.



Eine neue Heimat für das ZET

Das TAO-Gebäude auf dem Südcampus der Universität Bayreuth

Das Zentrum für Energietechnik (ZET) bündelt Expertise und Aktivitäten, die an mehreren Lehrstühlen in der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Bayreuth in den vergangenen Jahren aufgebaut worden sind. Von Beginn an war es das Ziel, die Idee des ZET auch räumlich in einem sichtbaren Zentrum umzusetzen. Hier sollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an einem gemeinsamen Ort noch enger zusammenarbeiten. Seit April 2018 ist es endlich soweit: das ZET hat sein Zuhause im Neubau der TechnologieAllianzOberfranken.

44 Millionen Euro investiert der Freistaat Bayern als Teil des Aktionsplans „Demographischer Wandel, ländlicher Raum“ und in der TechnologieAllianzOberfranken (TAO) auf dem Südcampus der Universität Bayreuth. Dabei entsteht ein neues und hochmodernes Laborgebäude, in dessen Südflügel das Zentrum für Energietechnik untergebracht ist. Auf mehr als 1.300 m² der gesamten 5.600 m² Labor- und Bürofläche kann nun innovative und zukunftsweisende Energieforschung noch besser betrieben werden als bisher. Durch gemeinsame „Keylabs“ werden die Aktivitäten der ZET-Mitglieder deutlich stärker vernetzt, so

dass insbesondere an den Schnittstellen der Fachgebiete neue Forschungsprojekte entstehen.

So werden zum Beispiel im Keylab „Analytik in der Energietechnik“ moderne Analytikgeräte betrieben. Mit den vorhandenen Messgeräten können beispielsweise Katalysatoren für die Erzeugung von alternativen Kraftstoffen, latente thermische Energiespeicher oder auch elektronische Bauteile genau charakterisiert werden. Sie alle und weitere Elemente tragen zu der angestrebten Transformation unseres Energiesystems wesentlich bei. Da gerade auch kleine und mittelständische Unternehmen in der Region von solchen Messdaten profitieren, die teuren Geräte selbst aber nicht finanzieren können, wird durch das Keylab ein Nährboden für den weiteren Ausbau der Kooperation zwischen ZET und regionaler Wirtschaft bereitet.

Nicht zuletzt ist es durch den Umzug der Geschäftsstelle des ZET auf den Südcampus noch einfacher, die zentrale Anlaufstelle für die ingenieurwissenschaftliche Energieforschung der Universität Bayreuth zu finden.



Kompakte Wärmespeicher mit hoher Leistung

Phasenwechsel und große Oberflächen führen zum Ziel

Speicher stellen einen elementaren Baustein einer erfolgreichen Energiewende dar. Um den von regenerativen Energiequellen erzeugten überschüssigen Strom zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben sind bisher hauptsächlich Pumpspeicher und Batterien im Gespräch. Eine attraktive kostengünstige Alternative stellen thermische Speicher dar, die ihre Wirksamkeit unter anderem bereits in der Energieeffizienzsteigerung von Industrieprozessen gezeigt haben. Vielversprechende Konzepte zur thermischen Energiespeicherung werden derzeit am ZET untersucht.



Latentwärmespeicher mit Makrokapseln mit Wärmedämmung (links) und ohne Wärmedämmung (rechts)

Um Wärme möglichst effizient auf kleinem Raum zu speichern, sind Lösungen mit einer hohen Energiedichte gefragt. Latentwärmespeicher bieten sich hierfür besonders an. Anders als sensible Speicher, welche die Wärme auf Grund einer Temperaturänderung speichern, wird hier ein fest/flüssig-Phasenwechsel genutzt, wie es auch in einfachen Handwärmern der Fall ist. Ein wesentlicher Vorteil hierbei: eine bis zu dreimal höhere volumetrische Energiedichte im Vergleich zu herkömmlichen Speichern.

Eine der Hauptherausforderungen bei diesem Speicherkonzept stellt die häufig geringe Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Phasenwechselmaterialien (engl. Phase Change Materials, PCM) dar, da hieraus eine geringe Be- und Entladeleistung resultiert. Um dies zu umgehen wird am ZET auf die sogenannte Makroverkapselung gesetzt. Das PCM wird dazu in Kapseln verpackt und von einem Wärmeträgerfluid umströmt, dem sich durch die Verkapselung eine wesentlich größere Oberfläche zur Wärmeübertragung bietet.

Wird Luft als Wärmeträgerfluid verwendet, ist die Herausforderung der niedrigen Be- und Entladeleistung nochmals verstärkt, da Luft auf Grund seiner geringen Dichte zu einem niedrigen Wärmeübergang führt. Daher wird in einem am ZET untersuchten Hochtemperaturspeicher, der von der enolcon gmbh entwickelt und von der Storasol GmbH gebaut wurde, auf Sand als Speichermaterial gesetzt. In den 10 Tonnen Sand wird die Wärme in diesem Fall sensibel, also rein auf Grund einer Temperaturänderung,

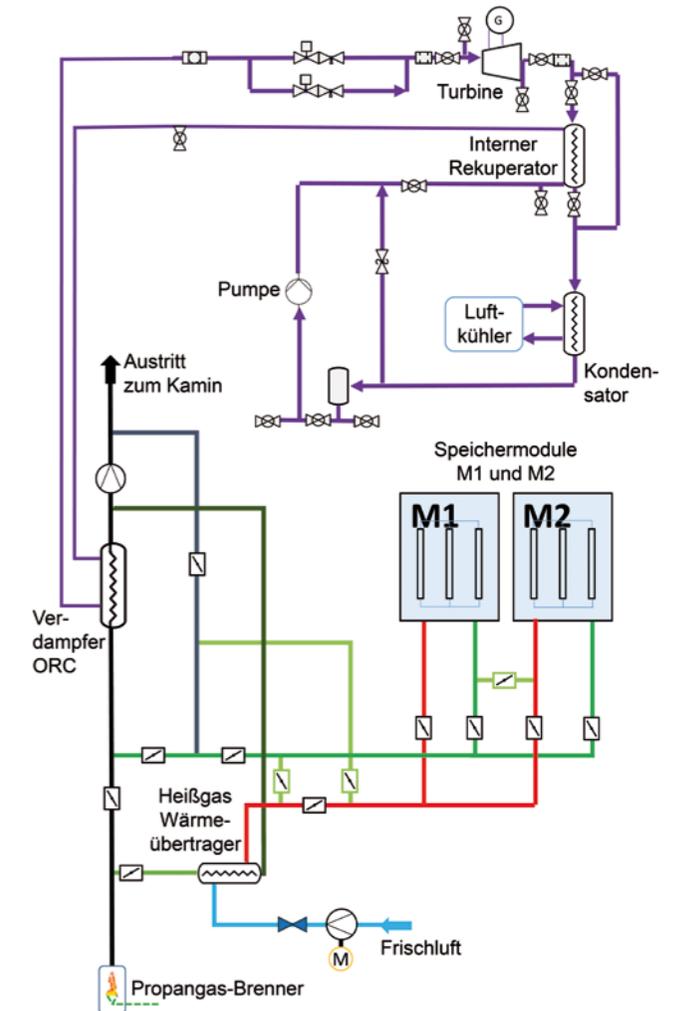


Hochtemperaturspeicher mit Sand als Speichermaterial während des Aufbaus

gespeichert. Bei maximalen Temperaturen von bis zu 600 °C ist diese jedoch entsprechend groß, was ebenfalls zu einer hohen Energiedichte führt. Der Hauptvorteil liegt allerdings in der in Summe sehr großen wärmeübertragenden Fläche der Sandkörner, die den Nachteil des schlechten Wärmeübergangs mehr als kompensiert.

In der Anwendung eignet sich dieser Hochtemperaturspeicher ideal für eine Kopplung mit dem ORC-Prozess um eine variable Stromerzeugung zu ermöglichen. Die Kombination beider Technologien wird zur Zeit in einer Demonstrationsanlage am ZET getestet, deren Funktionalität bereits 2016 in mehreren Versuchen bestätigt wurde.

Anlagenschema der Kombination aus Hochtemperaturspeicher und ORC



Neue Wege zur dezentralen Stromerzeugung

Geothermie und industrielle Abwärme – zwei unterschätzte Energielieferanten



Das deutsche Energiesystem ist im Wandel: Die bisherige zentrale Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdgas oder Uran soll soweit wie möglich durch dezentrale Anlagen mit erneuerbaren Energien ersetzt werden. Im Mittelpunkt steht dabei der massive Ausbau von Photovoltaik und Windkraftanlagen. Bisher weniger beachtet wurden dabei weitere Möglichkeiten, die das ZET besonders im Blick hat: Abwärme von Industrieprozessen und aus der Wärme im Erdinneren.

So verschieden die Quellen für Abwärme und für Geothermie auch sind, in beiden Fällen sind die Temperaturen, bei denen die Wärme zur Verfügung steht, mit etwa 100 bis 500 °C viel niedriger als bei der Verbrennung in konventionellen Kraftwerken, in denen Wasser verdampft wird. Eine besonders aussichtsreiche alternative Technologie beruht auf dem Organic Rankine Cycle (ORC), in dem statt Wasser ein organisches Fluid als Arbeitsmedium eingesetzt wird. Zu der Vielzahl an hierfür geeigneten Stoffen zählen Kältemittel, wie sie in Kühlschränken verwendet werden, und Kohlenwasserstoffe, wie sie auch als Bestandteile in Brenn- und Kraftstoffen vorkommen. Der Vorteil solcher organischen Fluide besteht darin, dass sie bereits bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen verdampfen und dabei höhere Drücke aufbauen als Wasser. Damit können auch Niedertemperaturquellen zur Stromerzeugung genutzt werden.

Industrielle Abwärme ist in Deutschland nahezu überall vorhanden und kann zur dezentralen Stromerzeugung genutzt werden



Eine neuentwickelte Mikro-Turbinengeneratoreinheit der Deprag Schulz GmbH im ORC-Testfeld des ZET.

In zahlreichen Projekten spannt hierbei das ZET den Bogen von der Grundlagenforschung zur Anwendung gemeinsam mit Industriepartnern. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von ORC-Systemen, die thermoökonomisch – also sowohl energetisch wie auch wirtschaftlich – optimiert sind. Diese Systeme helfen bei der dezentralen Stromerzeugung in geothermischen Kraftwerken und bei der Nutzung industrieller Abwärme. Das Potenzial ist dabei enorm: Man schätzt es allein in Deutschland auf etwa 8,5 Gigawatt für die Geothermie und 5 Gigawatt für die industrielle Abwärme.

Diese Potenziale sind derzeit jedoch kaum erschlossen. Das Hauptproblem in der Geothermie sind die Kosten für die Bohrung, über welche das etwa 130 °C heiße Wasser aus ei-

ner Tiefe von bis zu 5000 m an die Oberfläche gepumpt wird. Es gilt daher, hocheffiziente Kraftwerke zu bauen, welche das Thermalwasser optimal ausnutzen und somit einen hohen Wirkungsgrad erreichen. Bei der industriellen Abwärme liegt der Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung auf einer Senkung der Investitionskosten und der Ausweitung auf sehr kleine Anlagen. Hierfür kommen zum Beispiel modular aufgebaute ORC-Anlagen in Frage, welche am ZET im neu geschaffenen ORC-Testfeld vermessen werden können.

Ein weiteres Ziel laufender Arbeiten ist es, die ORC-Technologie und thermische Speichersysteme zu koppeln, um damit ein noch größeres Maß an Effizienz und Flexibilität zu erreichen. Dies wäre ein weiterer Schritt hin zu einer stabilen und wirtschaftlichen dezentralen Energieversorgung.

In Ländern wie Neuseeland ist die Geothermie schon seit Jahrzehnten etabliert. Aber auch in Deutschland wächst diese Nische stetig.



Energieversorgung von Krankenhäusern

Ein Beispiel für die Optimierung komplexer Energiesysteme



Modell der künftigen Vorzeigeklinik Green Hospital Lichtenfels.

War die Energieversorgung von Einrichtungen des Gesundheitswesens in früheren Jahren allein auf höchstmögliche Versorgungssicherheit ausgerichtet, so ergeben sich heute weitere Anforderungen z.B. hinsichtlich Klimaverträglichkeit sowie Energie- und Kosteneffizienz. Denn Krankenhäuser benötigen viel Energie. Die jährlichen Energiekosten der rund 2.100 deutschen Krankenhäuser summieren sich auf circa 1,5 Mrd. Euro.

Die Bedarfsseite stellt sich dabei mit unterschiedlichen benötigten Energieformen wie Wärme, Dampf, Kälte und Strom sowie mit unterschiedlichen Nutzerprofilen in Behandlungs-, Patienten- und sonstigen Bereichen sehr vielschich-

tig dar. Gleichmaßen trifft dies auf die Deckungsseite zu, die heute neben herkömmlichen Öl- und Gaskesseln zunehmend auch KWK-Anlagen, Absorptionskältemaschinen, Biomassekessel, Solarthermie, oberflächennahe Geothermie und ähnliches umfasst. Die Optimierung eines solchen Energiesystems stellt somit eine anspruchsvolle Aufgabe dar.

In Zusammenarbeit mit den Hochschulen Hof und Coburg führt das ZET über mehrere Jahre hinweg Forschungsarbeiten zur wissenschaftlichen Begleitung des Krankenhaus-Ersatzneubaus „Green Hospital Lichtenfels“ durch. Wesentliches Gesamtziel der Kooperation ist die Bewertung und Optimierung der Klinik im Hinblick auf Energieversorgung und -verbrauch.



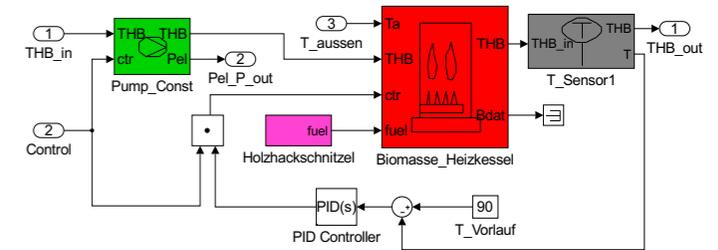
Mit regenerativer Energie und optimierter Gebäudehülle soll Passivhausstandard erreicht werden.

Bereits in der Planungsphase des Klinikums wurde seitens der Projektpartner ein Messstellenkonzept zur detaillierten Erfassung der Energieströme ausgearbeitet. Arbeitsschwerpunkt des ZET ist darauf aufbauend eine auf Modellrechnungen gestützte Identifizierung empfehlenswerter Maßnahmen für einen möglichst energie- und kosteneffizienten Betrieb der Energieversorgungsanlagen sowie ein effizientes Lastmanagement von Verbrauchern unter Berücksichtigung der im Klinikbetrieb unveränderbaren Rahmenbedingungen.

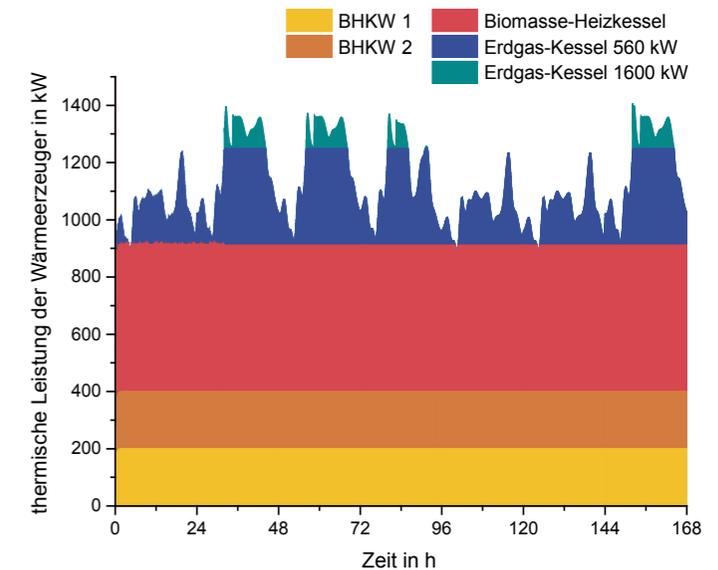
Auch auf internationaler Ebene ist das ZET in Aktivitäten zur Steigerung der Energieeffizienz in medizinischen Einrichtungen eingebunden. Gemeinsam mit Partnern aus Italien, Griechenland, Israel, Polen und Spanien wird in dem EU-Projekt „Support Tool for Energy Efficiency programmes in medical centres“ (STEER) ein Software-Tool entwickelt, welches die Kliniken in die Lage versetzt, ihren Energiebedarf zu analysieren und zu optimieren.

Solche für das Gesundheitswesen entwickelten Methoden und Programme zur Steigerung der Energieeffizienz lassen sich auch auf andere komplexe Energiesysteme, wie zum Beispiel von Energieversorgern und Industrieunternehmen, übertragen.

Mithilfe der simulierten Lastgänge der Wärmeerzeuger kann die Energieversorgung effizienter gestaltet werden

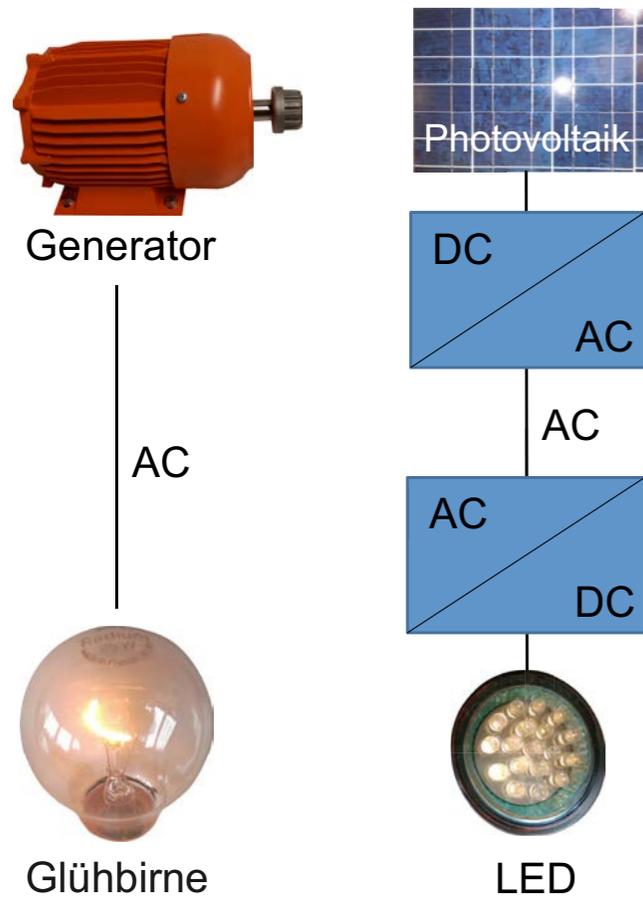


In der Computersimulation wird der Betrieb der Anlagenkomponenten nachgebildet und optimiert



Effiziente Energiewandler in DC- und AC-Netzen

Elektrische Energiewandlung – der Weg von Kupfer und Eisen zu Silizium und Intelligenz



Bisheriger und zukünftiger Weg der elektrischen Energie:
a) Ohne Leistungselektronik, b) Mit Leistungselektronik

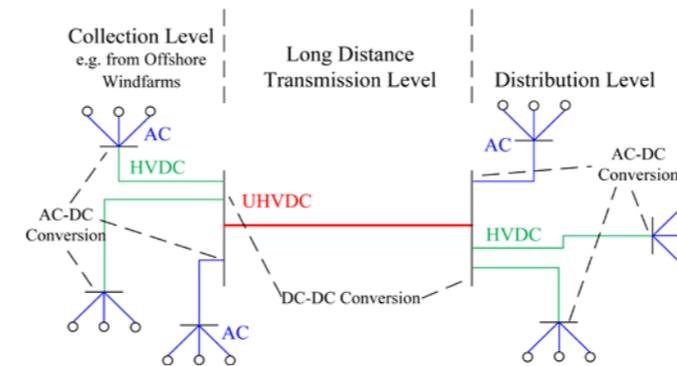
Wir beobachten einen massiven Wandel in der Energieerzeugung, weg von der konventionellen meist thermischen Wandlung mit konventionellen Generatoren am Netz hin zu regenerativen Quellen wie Wind und Sonne. Dabei sind sowohl die Windkraft als auch die Photovoltaik über leistungselektronische Energiewandler am Netz angebunden. Den gleichen Wandel sieht auch die Verbraucherseite, Weg von einfachen elektrischen Verbrauchern wie der Glühlampe oder der einfachen elektrischen Maschine hin zu Energiesparbeleuchtung und drehzahlvariablen Antrieben. Auch hier erfolgt die Anbindung am Netz über Leistungselektronik. Intelligente und effiziente leistungselektronische Wandler werden daher wesentlich die Zukunft der elektrischen Energie bestimmen.

Kaum ein anderes Gebiet ist so stark im Umbruch wie die Energietechnik. Im Folgenden möchte dieser Beitrag daher eine Übersicht entlang der elektrischen Energieflusskette vermitteln, besonders an welchen Stellen leistungselektronische Energiewandler die Zukunft prägen und welche aktuellen Themen hier die Forschung bestimmen.

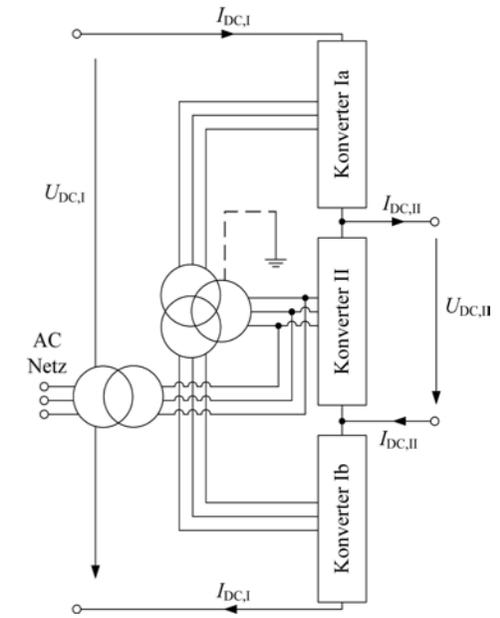
Photovoltaik erzeugt elektrische Energie in Form einer variable Gleichspannung, bei der Windkraft hingegen entsteht eine Wechselspannung variabler Frequenz und Höhe. Um diese Energiewandler an das elektrische Wechselspannungs-Netz (AC) anzubinden, sind daher leistungselektronische Wandler notwendig, die früher nicht erforderlich waren. Hier beschäftigt sich die Forschung

nicht nur mit der Effizienzerhöhung und Verkleinerung dieser Wandler, sondern auch damit wie diese Stellglieder zukünftig die Netzstabilität in Spannung und Frequenz gewährleisten können. Die konventionell vorhandene stabilisierende Wirkung von trägen Massen muss zukünftig durch intelligente Steuerverfahren gewährleistet werden. Die gezielte Einspeisung von Blindleistung sowie Vorhalt von lokalen Regelreserven ermöglichen hier die entsprechenden Lösungen.

Die Energieverteilung ist geprägt davon, dass Energie dort erzeugt werden sollte, wo die Quellen am effizientesten sind und dorthin geliefert werden sollte, wo sie gebraucht wird. Das Mittel der Wahl ist hier der Übergang vom heutigen AC Netz zum DC Supergrid. Bei höheren Übertragungsentfernungen lassen sich hier die Verluste gegenüber der



Übertragung der elektrischen Energie mit HVDC



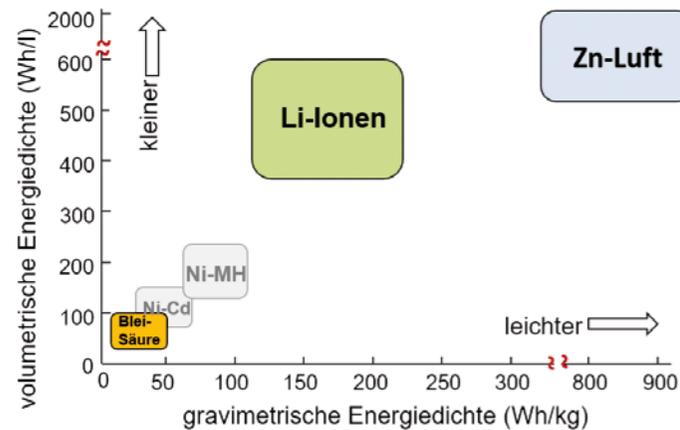
Strukturdiagramm eines HVDCDC-Wandlers

AC-Technik mehr als halbieren. Benötigt werden dazu wiederum Energiewandler, welche mit moderner Leistungselektronik von z.B. 300kV-DC die Spannung zu 500kV-DC wandeln kann.

Auch direkt beim Endverbraucher ermöglichen die leistungselektronischen Wandler, dass das Ladegerät des Laptops nur wenige 100 g statt einige kg wiegt. Dabei hat der nächste große Schritt der Evolution in dem Bereich gerade erst begonnen, nämlich die Ablösung der siliziumbasierten Technik durch die sogenannten wide-band-gap Materialien. Ein Hauptvertreter im oberen Leistungsbereich ist hier Silizium Carbide, welches mit einem Zehntel der Dicke gegenüber Silizium auskommt und damit bei den Energiewandlern eine weitere Halbierung von Größe und Verlusten verspricht. Im unteren Spannungsbereich verspricht Gallium Nitrid diese Rolle zu spielen. So ist die leistungselektronische Energiewandlung wohl das einzige Teilgebiet der Energietechnik in dem man das Mooresche Wachstumsgesetz wiederfindet. Die immer höher werdende Energiedichte der Wandler, welche mit einer immer höheren Effizienz einhergeht ist daher ein entscheidender technologischer Antrieb für eine effiziente Zukunft der Energiewandlung und des Energietransportes.

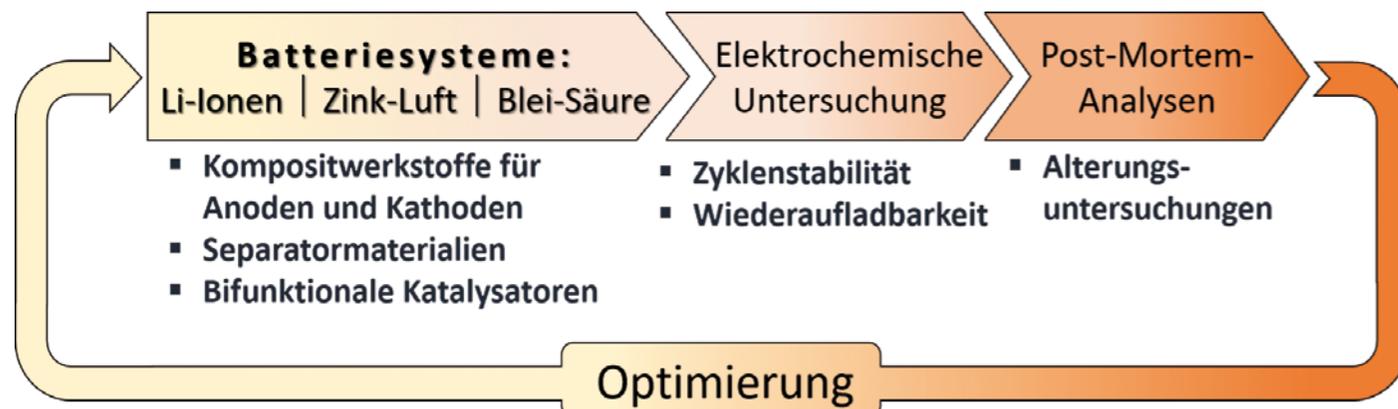
Neue Werkstoffe für Batterien

Batteriesysteme für mobile und stationäre Anwendungen



Volumetrische und gravimetrische Energiedichten diverser Batteriesysteme

Entwicklung von Batteriewerkstoffen am ZET



Leistungsfähige und kostengünstige Speichertechnologien für erneuerbare Energien sowie mobile Anwendungen gewinnen heutzutage zunehmend an Bedeutung. Das ZET beschäftigt sich daher mit der Materialentwicklung für wiederaufladbare Batterien, sog. Sekundärbatterien, basierend auf verschiedenen Stoffsystemen, welche Lösungen sowohl für mobile als auch stationäre Energiespeicheranwendungen bieten: Lithium-Ionen, Blei/Säure und Zink/Luft.

Die Kompetenzen des ZET bündeln sich in der Materialsynthese für Batteriewerkstoffe, der Elektroden- und Zellpräparation sowie der elektrochemischen und analytischen Charakterisierung der Batteriematerialien. Die Beschichtung von Materialien mit Funktionswerkstoffen erfolgt durch chemische, physikalische oder mechanische Methoden.

Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zeichnen sich durch hohe Energiedichten und Zyklenstabilitäten aus und gelten daher als Grundbaustein der elektrifizierten Mobilität. Ein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung neuartiger Anodenmaterialien mit hohen Energiedichten. Hierbei werden kohlenstoffbasierte Elektrodenmaterialien entwickelt, welche entweder mit nanoskaligem Silizium oder Metalloxiden durch verschiedene Beschichtungsmethoden funktionalisiert werden. Ziel dabei ist es, sowohl eine hohe elektrische Perkolation, als auch mechanische Stabilität zu erreichen, um somit eine hohe Zyklenstabilität mit hohen Kapazitäten zu gewährleisten.

Separatoren für Lithium-Ionen-Batterien

Als kommerzielle Separatoren für LIB werden bisher überwiegend polymerbasierte, mikroporöse Folien oder Gewebe eingesetzt. Diese sind jedoch nur bis Temperaturen weit unter 200 °C mechanisch stabil. Das ZET entwickelt glasbasierte Separatoren, welche bis Temperaturen von bis zu 600 °C mechanisch stabil sind und dabei keinen signifikanten Schrumpf zeigen.

Batteriewerkstoffe für wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien

Zink-Luft-Batterien weisen gegenüber LIB eine noch höhere Energiedichte auf. Da dieses Stoffsystem außerdem ressourceneffizienter realisiert werden kann, besteht ein hohes Interesse daran, ausgehend von bereits bestehenden Primärzellen wiederaufladbare Systeme zu entwickeln. Aufgrund der bisher eingesetzten Elektrodenmaterialien

ist die Wiederaufladbarkeit von Zink-Luft-Zellen begrenzt. Daher werden am ZET neue Materialkonzepte, die sowohl Elektroden- als auch Elektrolytwerkstoffe umfassen, entwickelt und untersucht. Hierbei steht die Modifikation der Zinkanode mit Funktionsoxiden sowie die Herstellung kohlenstoffarmer, bifunktionaler Komposit-Katalysatoren im Vordergrund.



Katalysatormaterial für die Kathode von Zink-Luft-Batterien

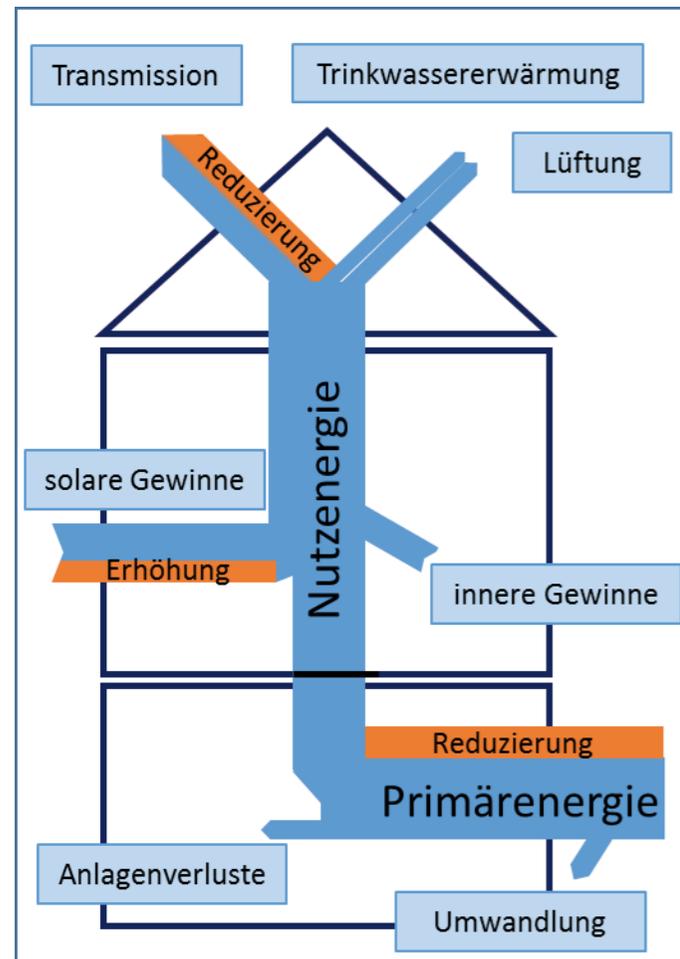
Anoden- und Kathodenmaterialien für Blei-Säure-Batterien

Für den sofortigen Einsatz als stationäre Energiespeicher sind etablierte Sekundärbatteriesysteme wie Bleibatterien attraktiv. Dabei ist es allerdings notwendig, die Lebensdauer vor allem bei hohen Ladehuben oder bei Zyklierungen im teilgeladenen Zustand zu erhöhen. Eine Forschungsaktivität des ZET besteht daher in der Modifikation von Bleibatterieelektroden.

Dieses Forschungsgebiet wurde von Frau Prof. Monika Willert-Porada initiiert und bis zu ihrem Tod im Dezember 2016 am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung bearbeitet.

Werkstoffe für energieeffiziente Gebäude

Mikrohohlglaskugeln als Basis energieeffizienter Fassaden und Wandputzen



Um die von der Bunderegierung formulierten Klimaziele mit einem um 80 % gesenkten Energiebedarf bis 2050 realisieren zu können, müssen jährlich zwei Prozent des Gebäudebestands energetisch saniert werden - zurzeit liegt die Sanierungsrate im Gebäudebestand jedoch bei nur 1 %. Deshalb wird in vielen Bereichen der Gebäudesanierung nach Energieeinsparungsmöglichkeiten geforscht. Dabei stellen Innen- und Außenwände das größte Potential dar, da dort der größte Teil an Wärmeaustausch erfolgt. Energieeinsparungen können dabei über zwei Möglichkeiten erfolgen: Zum Einen durch eine Optimierung der momentanen Isolierlösungen und zum Anderen über funktionelle Wandputze.

Problematisch an derzeit eingesetzten Isolierlösungen sind Wärmebrücken, die aufgrund höherer Wärmeleitfähigkeit des polymeren Befestigungssystems im Vergleich zum Isoliermaterial entstehen. Deshalb ist ein Ziel aktueller Arbeiten am ZET, die Wärmeleitfähigkeit der polymeren Komponente durch den Einsatz von Mikrohohlglaskugeln (MHGK) anzupassen.

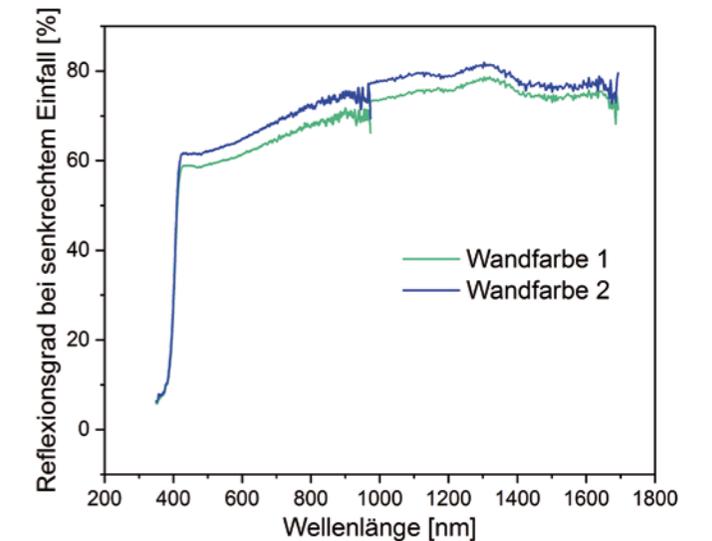
Durch passende Beschichtung der MHGK mit funktionellen Silanen und Modifikation der polymeren Matrix kann neben der verbesserten Dämmwirkung auch die Anbindung zwischen Polymer und Glas optimiert und so die erforderliche mechanische Stabilität der Bauteile gewährleistet werden.

Energieströme (blau) eines Gebäudes mit möglichen Verbesserungsansätzen (orange)

Ein weiterer Themenschwerpunkt ist die Funktionalisierung von Wandputzen und Wandfarben, um somit z.B. durch Wärmestrahlung der Sonne im Winter einen erhöhten Wärmeeintrag ins Gebäude zu ermöglichen - im Sommer hingegen soll dieser minimiert werden. Die Variable ist dabei der Einstrahlwinkel. In den Innenräumen hingegen soll die Wärmestrahlung von Heizkörpern, Lampen, aber auch von Menschen an den Wänden möglichst gut reflektiert werden. In beiden Fällen wird dies durch Einbringung von Mikrohohlglaskugeln in die Baustoffe erreicht, die je nach Anwendung auf der Oberfläche z.B. metallisiert werden.

Hierfür stehen dem ZET unterschiedliche Verfahren zur Beschichtung der Glaspartikel (z.B. nasschemisch oder Wirbelschicht-CVD) zur Verfügung. Zudem kann mit einer Ulbricht-Kugel (Innendurchmesser: 20 cm) die Reflexion der neuen Baustoffe winkelabhängig vermessen werden. Durch den Einsatz einer Plasmaweißlichtquelle kann ein Spektralbereich von 350 – 1700 nm abgedeckt werden.

Dieses Forschungsgebiet wurde bis zu ihrem Tod im Dezember 2016 von Frau Prof. Monika Willert-Porada am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung vertreten und inzwischen von Prof. Gerdes im Keylab Glastechnologie weitergeführt.



Links: Ulbricht-Kugel zur Messung der Reflexion, rechts: Beispielmessung zweier Wandfarben

Effiziente und zuverlässige dezentrale Energieversorgung

Moderne Methoden des Batterie- und Energie-Managements



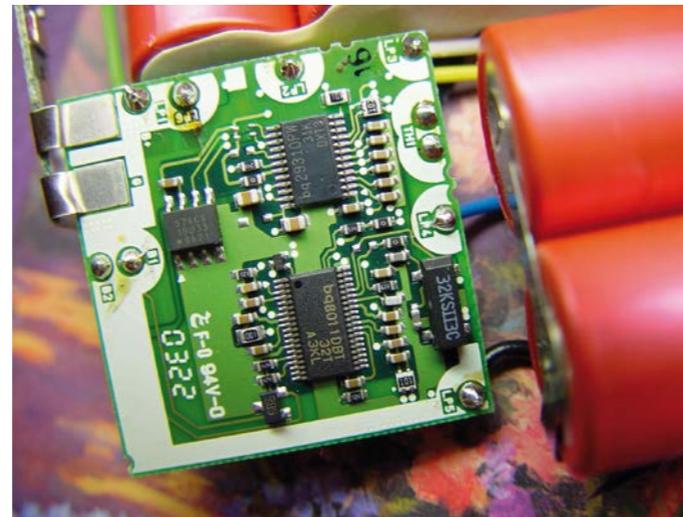
Laden eines Elektrofahrzeugs

Elektrische Energiesysteme, mobil oder stationär, in Form von Hybrid- und Elektrofahrzeugen oder von Gebäuden und Netzen, sind komplexe technische Systeme, in denen in kurzer Zeit große Mengen an elektrischer Energie transportiert, gespeichert und gewandelt werden. Die elektrische Systemtechnik sorgt für eine zuverlässige und wirtschaftliche Realisierung und dafür, dass eingesetzte Betriebsmittel, wie Batterien, sicher und langlebig betrieben werden können.

Der zuverlässige, effiziente und langlebige Einsatz von elektrochemischen Energiewandlern und -speichern, wie Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen, er-

fordert deren elektronische Überwachung und die Einhaltung von Betriebsgrenzen. Darüber hinaus ist es notwendig, Zustände, die zu einer Alterung bzw. irreversiblen Leistungseinbußen führen, zu vermeiden und sicherheitskritische Zustände, wie das Überladen von Batterien, die zu einer Gefährdung der Umgebung oder der Nutzer führen, zu verhindern.

Das ZET entwickelt moderne, intelligente Verfahren des Batterie- und Energie-Managements, die sowohl daten- als auch modellbasiert arbeiten. Dies bedeutet, dass



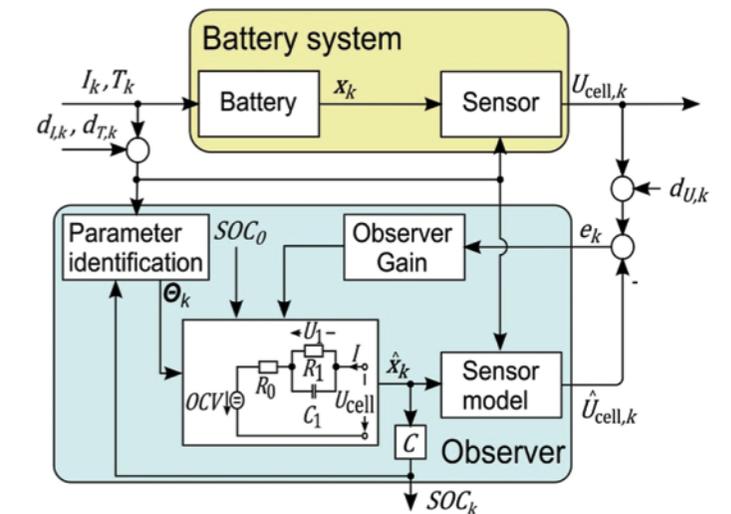
Überwachungselektronik eines Batteriemoduls

Steuerungsentscheidungen auf Basis von aktuell ermittelten Daten des Systems sowie auf Modellen der Technologien, d.h. basierend auf mathematisch formalisierten Kenntnissen über die Systeme, getroffen werden.

Bei datenbasierten Verfahren kommen Sensoren für eine Messwerterfassung und Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) für einen Datenaustausch in Echtzeit zum Einsatz. Beispielweise sei hierzu die Spannungsmessung einzelner Batteriezellen genannt, die zur Einhaltung von Spannungsgrenzen und dem Abbruch von Ladevorgängen notwendig ist.

Am ZET entwickelte modellbasierte Methoden für den sicheren und langlebigen Betrieb von Batterien und Brennstoffzellen setzen ein fundiertes Verständnis der physikochemischen Zusammenhänge sowie eine präzise Modellierung des tatsächlichen Verhaltens der elektrischen Leistungsbereitstellung voraus. Modellbasierte Algorithmen nutzen die Kenntnisse des Systems, um beispielsweise innere, nicht messbare Zustände, wie z.B. den Lade- oder Alterungszustand einer Lithium-Ionen-Batterie zu ermitteln. Weitere Einsatzfelder modellbasierter Methoden sind, erstens, die Leistungsprognose, d.h. die Vorhersage der im nächsten Zeitintervall sicher zur Verfügung stehenden Leistung, z.B. für Überholvorgänge eines Elektrofahrzeugs. Zweitens, die Energieprognose, die Vorhersage der noch entnehmbaren Energie eines elektrischen Speichers zur präzisen Reichweitenberechnung eines Elektrofahrzeugs, um zu verhindern, dass der Fahrer

vor dem Erreichen der nächsten Steckdose liegen bleibt. Drittens, die Laderegelung z.B. für die Schnellladung von Elektrofahrzeugen, so dass man in kurzer Zeit eine ausreichende Energiemenge für die nächste Fahrstrecke tanken kann. Und viertens, die Laderegelung für Solarstromspeicher, die so betrieben werden sollen, dass Batterien die solare Eigendeckung in Gebäuden erhöhen, sich aber auch netzverträglich verhalten, d.h. das Stromnetz vor zu hohen Lastspitzen und Lastgradienten schützen.



Strukturdiagramm eines Batteriezustandsschätzers

Elektrochemische Speicher und Wandler für die Energiewende

Batterie und Brennstoffzelle anstatt Dieselmotor und Ölheizung



Photovoltaik-Module



Akkumulatoren

Aufgrund der Begrenztheit fossiler Ressourcen, der schwer einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte und der verbindlichen Klimaziele haben Politik und Industrie einen Paradigmenwechsel eingeläutet, von Verbrennungsmotoren zur Elektromobilität. Auch in stationären Systemen, in Wohngebäuden, bei Gewerbe und Industrie geht der Trend zu einer dezentralen Energieversorgung mit Photovoltaikanlagen, Blockheizkraftwerken, Wärmepumpen und elektrischen Speichern.

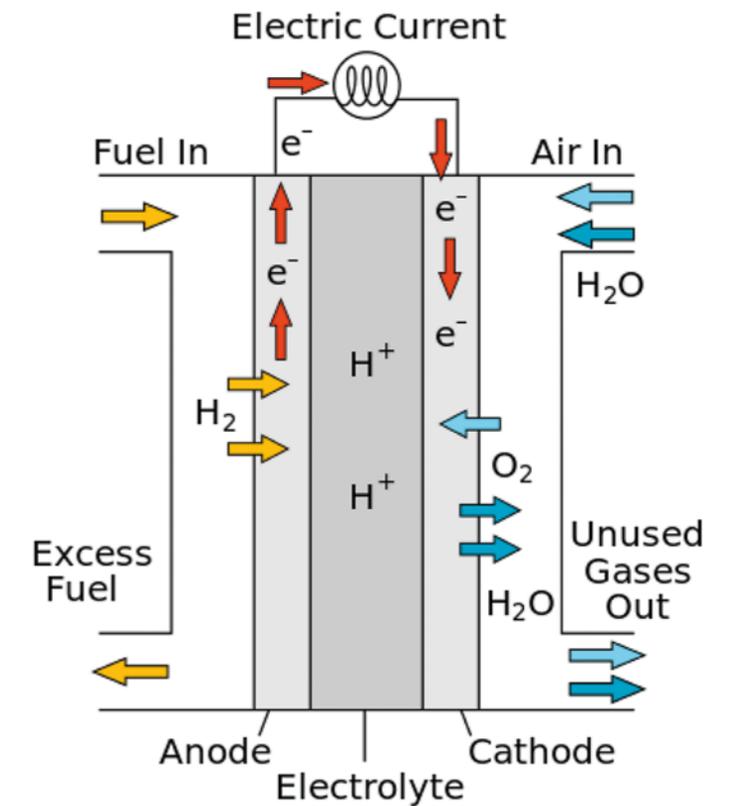
Eine Hauptrolle des neuen Energiesystems werden dabei Batterien und Brennstoffzellen spielen. Letztere sind elektrochemische Wandler, die chemische Energie, z.B. in Form von Wasserstoff, direkt in elektrische Energie wandeln können ohne dabei den Umweg über die Verbrennung gehen zu müssen. Sie unterliegen nicht der Begrenzung des Carnot-Wirkungsgrads und können so dem Brenngas mehr Nutzenergie abgewinnen als Verbrennungskraftmaschinen. Im Einsatz in Fahrzeugen zeichnen Sie sich durch hohe Reichweiten, schnelle Tankvorgänge und durch die Abwesenheit lokaler Emissionen aus. Reaktionsprodukt ist reines Wasser. Für den Einsatz in Gebäuden kann, neben der elektrischen Energie, auch Nutzwärme gewonnen werden.

Akkumulatoren oder Sekundär-Batterien sind elektrochemische Speicher, die elektrische Energie unter sehr hohem Wirkungsgrad speichern und in portablen, mobilen und stationären Anwendungen zum gewünschten Zeitpunkt bereitstellen können. Moderne Akkumulatoren, wie Lithi-

um-Ionen-Batterien, zeichnen sich durch hohe Energie- und Leistungsdichten und eine lange Lebensdauer aus. Ihre Erforschung und Weiterentwicklung ist die Voraussetzung für den Erfolg von Smartphones, Elektrofahrzeugen und dezentralen Solarspeichern.

Das ZET nimmt elektrochemische Energiespeicher und -wandler aus systemtechnischer Perspektive in den Blick und besetzt damit eine Brückenfunktion an der Schnittstelle von Materialwissenschaft, Elektrochemie und industrieller Fertigung. Im Fokus der Forschungsaktivitäten stehen dabei die ingenieurwissenschaftliche Analyse und Modellierung elektrochemischer Energiesysteme wie Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen. Die Infrastruktur des ZET ermöglicht eine umfassende, testbasierte Untersuchung der Performance und Lebensdauer.

Ziel der Arbeit ist es, die methodischen Grundlagen für eine effiziente und nachhaltige Energiewandlung und -speicherung im Allgemeinen sowie einen dynamischen, langlebigen und zuverlässigen Einsatz von Batterien und Brennstoffzellen im Speziellen zu erforschen. Die entwickelten Verfahren und Modelle sollen dabei sowohl in der Elektromobilität als auch für gebäudeintegrierte und netzgekoppelte Speicher und Wandler nutzbar gemacht werden.



Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle

Renaissance der elektrischen Raumheizung

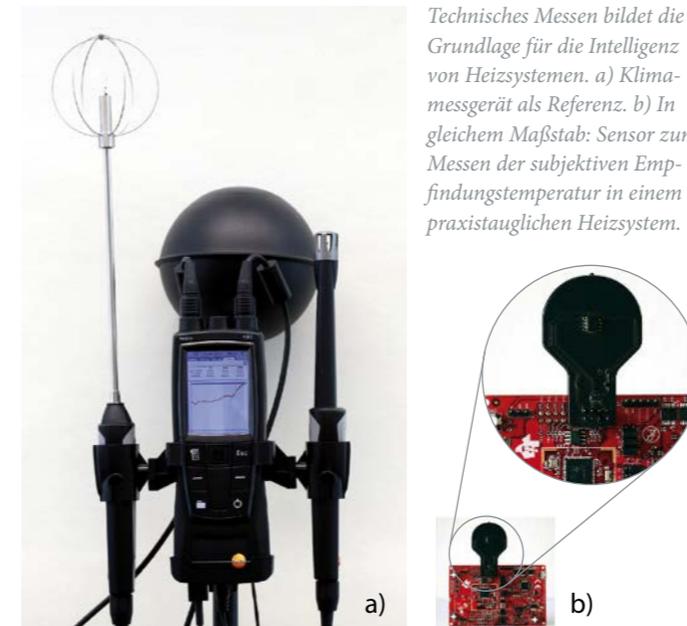
Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien mit Wärmepumpen und Deckenheizungen

Die Verfügbarkeit regenerativ erzeugter elektrischer Energie führt zu der Überlegung, ob damit sinnvoll und effizient geheizt werden kann. Gerade alte Mehrfamilienhäuser, die einen großen Teil des Wohnraumes in Deutschland ausmachen, stellen aber in dieser Hinsicht eine Herausforderung dar. Eine Umrüstung dieser Gebäude auf Heizsysteme, die regenerative Energieträger nutzen, bringt hohe einmalige Investitionssummen und große bauliche Maßnahmen mit sich.

Das ZET verfolgt daher mit verschiedenen Projektpartnern ein Konzept, bei dem ein Mehrfamilienhaus sukzessive nachgerüstet werden kann und bei dem ein individuelles und behagliches Klima in jedem Raum entsteht. Genutzt werden einerseits eine Wärmepumpe, die das Warmwasser zur Versorgung der bestehenden Heizkörper bereit-

stellt, und andererseits elektrisch betriebene Heizfolien, die Infrarotstrahlung emittieren. Vorteilhaft ist dabei, dass die an der Decke verteilten Heizfolien die Wärme schneller auf den zu erwärmenden Körper übertragen und weniger Energie für die Erwärmung von Luft verloren geht. Die Wärmepumpe sorgt dann lediglich für eine abgesenkte Grundtemperatur im Raum. Um die Energieeffizienz zu verbessern, muss das System „intelligenter“ gemacht werden (verbesserte Regelungstechnik). Die einzelnen Heizfolien sind derart zu betreiben, dass dort, wo sich Personen aufhalten, möglichst schnell ein behagliches Punktklima

Heizfolien an Decke und Wand, eingelassener Schaltschrank mit Regelung und Energieversorgung, verteiltes, heterogenes Sensor- und Aktorsystem und Wärmepumpe außerhalb des Raumes.

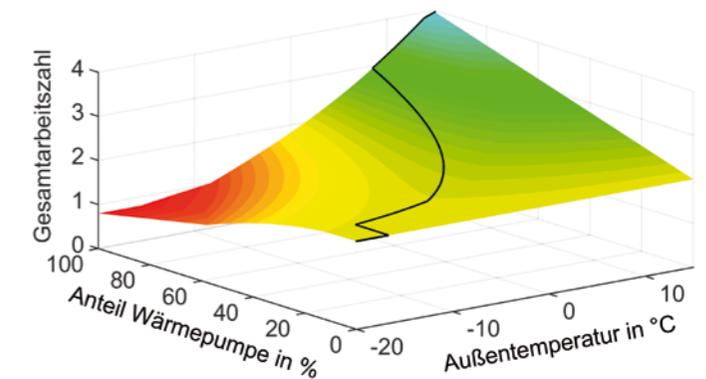


Technisches Messen bildet die Grundlage für die Intelligenz von Heizsystemen. a) Klimamessgerät als Referenz. b) In gleichem Maßstab: Sensor zum Messen der subjektiven Empfindungstemperatur in einem praxistauglichen Heizsystem.

erzeugt wird und Wärmepumpe und Heizfolien möglichst optimal zusammen spielen. Deshalb erfasst ein verteiltes Funksensorsystem einerseits die Anwesenheit von Personen und andererseits die subjektive Empfindungstemperatur an relevanten Stellen im Raum. Die Regelung stellt dann dort, wo sich jemand aufhält, eine angenehme Temperatur her. Durch Simulationen konnte ein Maximum der Arbeitszahl (Quotient aus nutzbarer Wärme zu ein-

gebrachter elektrischer Energie) in Abhängigkeit von der Außentemperatur ermittelt werden. Daraus lassen sich der Betriebspunkt der Wärmepumpe und die Stellbefehle für die jeweiligen Heizfolien ableiten. Die, bei moderaten Außentemperaturen hohe, Arbeitszahl der Wärmepumpe nimmt bei sinkenden Außentemperaturen ab. Die Heizfolien, deren Betrieb vom Außenklima unabhängig ist, puffern dies ab. So würde beispielsweise bei -20 °C nur 10 % der Energie durch die Wärmepumpe eingetragen.

Zur Validierung des Konzepts werden derzeit die Verbräuche einer mit dem Heizsystem ausgestatteten Wohnung sowohl mit der Simulation als auch mit den Verbrauchsdaten der Vorjahre verglichen.



Simulation als Basis der Systemoptimierung. Hier ist die Gesamt-Arbeitszahl des neuartigen intelligenten Heizsystems dargestellt.

Elektrische Energie aus Gebäudevibrationen

Energy-Harvesting für energieautarke Funksensoren



Die Welt wird immer vernetzter. Ob in Fabriken, im Auto, im Smartphone oder in Wohnungen – künftig werden immer mehr Sensoren ihre Umgebung beobachten und wichtige Informationen mit anderen Geräten teilen, damit sich die Sicherheit, der Komfort oder die Ressourceneffizienz technischer Einrichtungen verbessert. Ein Beispiel ist die Raumheizung im Wohnbereich: je besser sie über die momentane Temperatur innen und außen, die Anwesenheit von Personen, deren Behaglichkeitsempfinden, das morgige Wetter oder die Verfügbarkeit umweltfreundlichen Stroms Bescheid weiß, umso zielgerichteter und effizienter kann sie agieren.

Im Rahmen dieses Szenarios kommunizieren die Geräte häufig zweckmäßigerweise per Funk. Um den wenig umweltfreundlichen Einsatz von Batterien zu vermeiden, sind die Funksensorknoten der Zukunft idealerweise energieautark. Sie müssen ihre Energie also aus ihrer Umgebung beziehen.

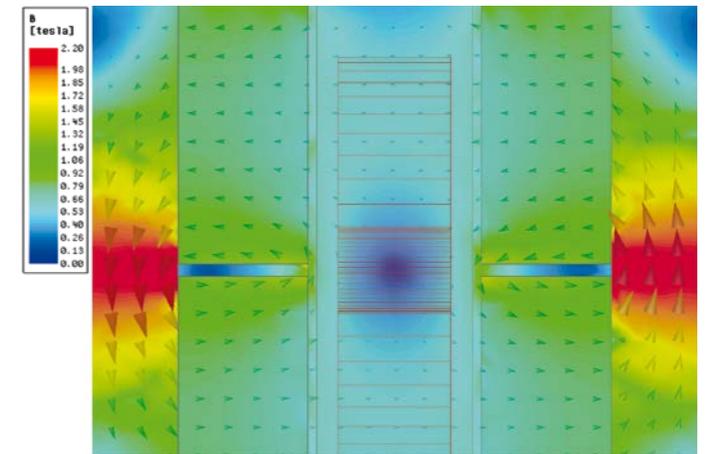
Diese Wandlung von kostenlos in der Umgebung verfügbarer Energie in elektrische Energie wird auch als „Energy-Harvesting“ („Energie-Ernte“) bezeichnet. Beim kinetischen Energy-Harvesting etwa soll die in Mikrovibrationen von Fußböden oder Treppen enthaltene mechanische Energie ausgenutzt werden. Solche Vibrationen sind im Hausbereich überall verfügbar; ihre Quellen stammen von

Die Energy Harvester werden am eigens dafür konzipierten Laborprüfstand charakterisiert.

zufallenden Türen, vorbeilaufenden Menschen oder dem Straßenverkehr vor dem Haus. Die Vibration kann zum Beispiel dazu benutzt werden, um Magnete in der Nähe einer Spule zu bewegen. Nach dem Dynamoprinzip entsteht dann eine elektrische Induktionsspannung und damit elektrische Energie, die gespeichert wird. Die geerntete Energie ist nur gering, aber durch die Zwischenspeicherung lässt sie sich anhäufen, um einem Funksensorknoten alle paar Minuten das Absenden eines Funktelegramms zu erlauben.

Die Forschungsarbeit des ZET bezieht sich auf Grundlagen zur Nutzbarmachung von Gebäudevibrationen. Dabei werden verschiedene Konzepte zur Energiewandlung durchdacht und getestet. Methodisch werden theoretische Überlegungen zum Systemaufbau angestellt, rechnergestützte Simulationen zur Optimierung von Geometrie und Materialeinsatz durchgeführt und Versuche am vollautomatisierten Prüfstand gefahren.

Einen Schwerpunkt bildet dabei die Selbstadaptivität des Harvesters. Unterscheiden sich nämlich das Frequenzspektrum der Vibrationen und die Resonanzfrequenz des Harvesters zu stark, kann keine elektrische Energie mehr gewonnen werden. Eine automatische Adaption (Anpassung) des Systems an die Umgebung schafft hier Abhilfe. Die große Herausforderung dabei ist es, die regelmäßige Selbstanpassung so zu gestalten, dass der Aufwand für ihren Betrieb den durch sie erreichten energetischen Nutzen nicht übersteigt. Wenn dies gelingt, lassen sich Nachhaltigkeit und digitale Vernetzung vereinen.



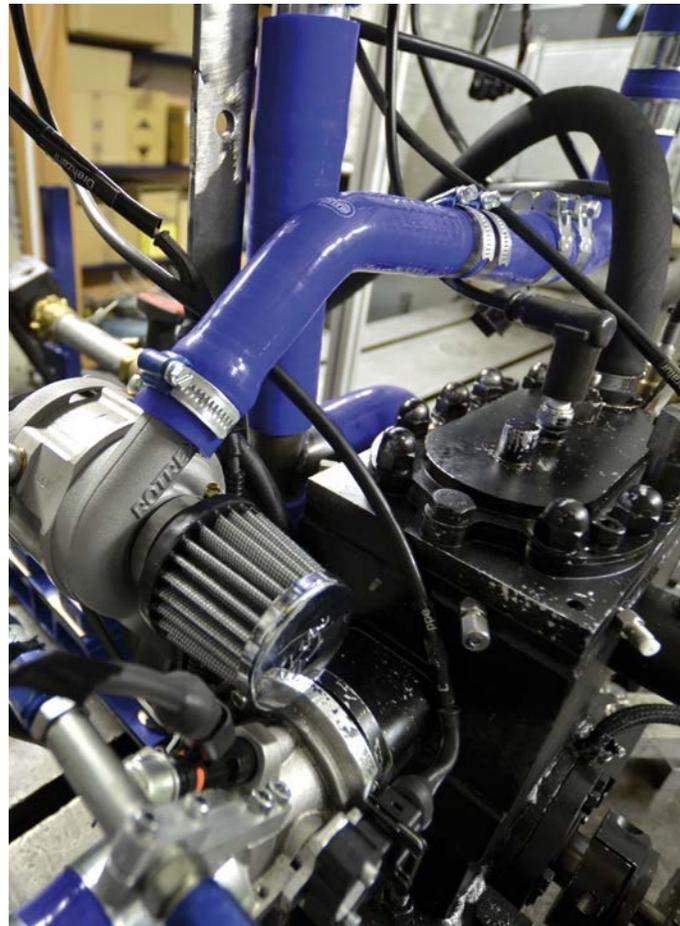
Die Auslegung der Energy Harvester beruht auf ausgedehnten Simulationen. Hier das Ergebnis einer Magnetfeldberechnung.



Zukunft mit dem Internet of Things? Nicht, wenn das ZET seine Energy Harvesting-Träume verwirklichen kann.

Ökostrom trotz Windflaute und Wolkent Teppich?

Nutzung von Biokraftstoffen zur Stromerzeugung mittels Verbrennungsmotoren



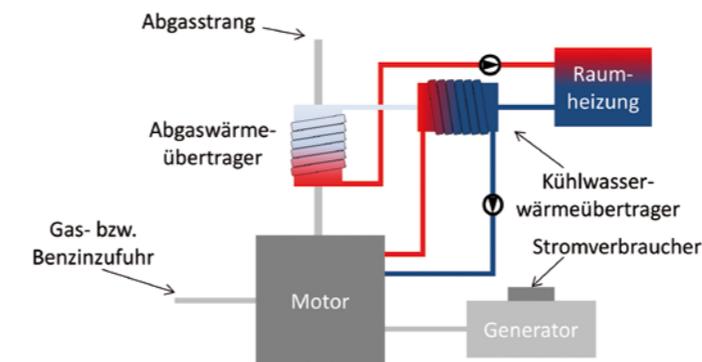
Prototyp des Zweitakt-Doppelkolbenmotors am Motorenprüfstand des ZET

Bis 2050 soll der Anteil an erneuerbaren Energien von derzeit 30 % auf mindestens 80 % der Stromversorgung steigen. Schon jetzt beträgt der Anteil stundenweise über 60 %. Dies ist der fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind und Sonnenenergie geschuldet. Um aber auch Flaute ausgleichen zu können, bedarf es neben der kaum mehr erweiterbaren Wasserkraft, wetterunabhängiger Energiequellen. So rücken vermehrt Biokraftstoffe, die in großen Mengen speicher- und abrufbar sind, ins Blickfeld der Forschung. Diese können zum Beispiel direkt aus organischen Abfallstoffen oder über Syntheseverfahren gekoppelt mit fluktuierendem Überschussstrom hergestellt und mit Hilfe von Blockheizkraftwerken in elektrische und thermische Energie gewandelt werden. Derartig erzeugte Kraftstoffe stellen die Entwickler von Verbrennungsmotoren vor neue Herausforderungen.

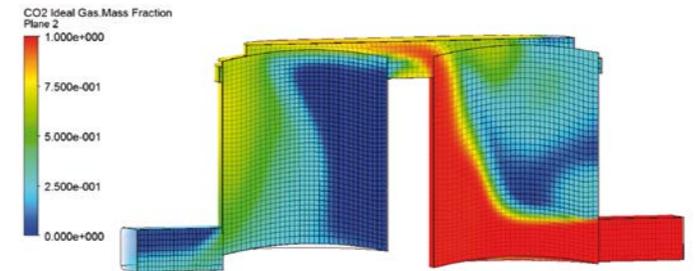
Biogas besteht aus 50 % - 75 % Methan und hat dadurch einen um 45 % geringeren Heizwert als Ottokraftstoffe. Zusätzlich liegt es bereits gasförmig vor und kann somit nicht zur Innenkühlung des Motors beitragen. Dies zusammen führt zu einem signifikanten Leistungsverlust bei der Verwendung als Kraftstoff. Vorteilhaft zeigen sich aber ein um 30 % geringerer CO₂-Ausstoß und ein höherer Wirkungsgrad. Um den Leistungsverlust entgegenzuwirken, müssen großvolumige Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Dies steht aber nicht nur im Widerspruch zur ressourcenschonenden und energiesparenden Herstellung, sondern hat auch bezogen auf den mobilen Einsatz

negative Auswirkungen auf die zu bewegende Masse und folglich emittiertes CO₂.

Daher befasst sich das ZET mit der Entwicklung alternativer Motorkonzepte zur Verwendung von Biogas als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren. Ein bisher noch großes, ungenutztes Potential zur Leistungssteigerung liegt in der Reduzierung der Arbeitstakte, die pro Arbeitszyklus notwendig sind. Durch die Verwendung des Zweitaktprinzips kann eine signifikante Steigerung der Leistungsausbeute erwirkt werden. In langsamlaufenden Dieselmotoren dient dieses Prinzip bereits heute der Fortbewegung von Schiffen und weist dort die größten Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren auf. Aus dem Bereich der schnelllaufenden Verbrennungsmotoren wurde es aus den meisten



Schema eines BHKWs



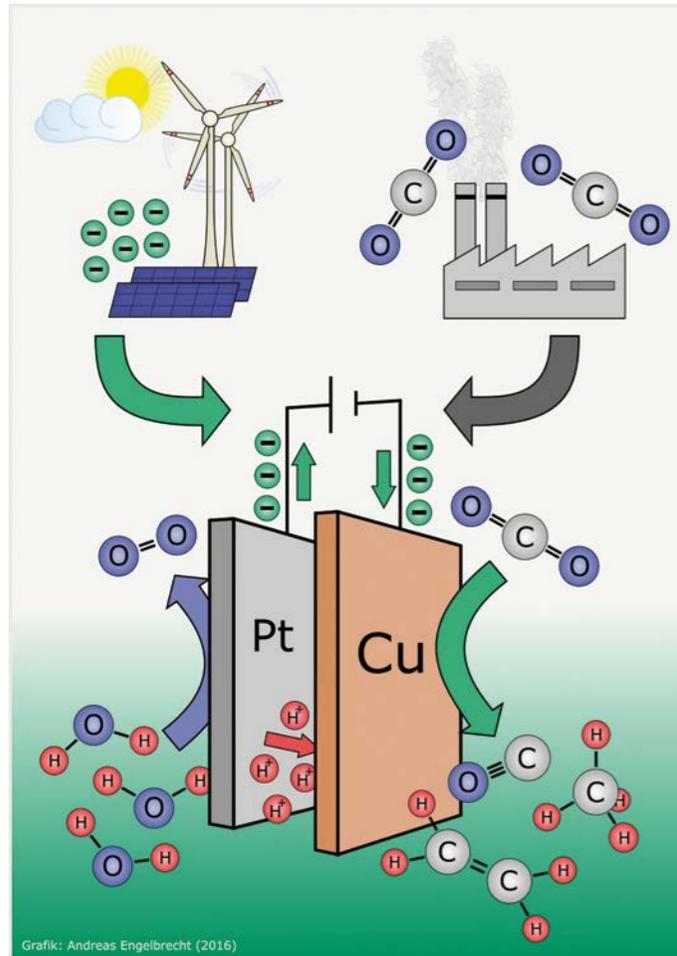
Simulation des Ladungswechsels

Anwendungsgebieten aufgrund von Kurzschlussströmungen und der folglich hohen Kohlenwasserstoffemissionen verdrängt. Verantwortlich hierfür ist der bei diesen Motoren notwendige Ladungswechsel nach der Umkehrspülung. Basierend auf einem bereits bekannten Motorprinzip, dem Doppelkolbenmotor, welches ein hohes Potential zur Reduzierung von Kurzschlussströmungen aufweist, soll das Zweitaktprinzip für schnelllaufende Motoren optimiert werden.

Dies erfolgt am Motorenprüfstand des ZET durch Messungen an einem realen, bereits gefertigten Prototypen. Die Vorauslegung und Optimierung wird mittels numerischer Simulationsmodelle durchgeführt. Durch die Kopplung von Prüfstandsversuchen und Simulation soll hierbei ein leistungsstarker, effizienter und kostengünstiger Motor für den zukünftigen Einsatz zur wetterunabhängigen Stromerzeugung unter Verwendung regenerativer Biokraftstoffe entwickelt werden.

Das Treibhausgas CO₂ als Rohstoff?

Die Synthese von Kohlenwasserstoffen mit regenerativer Überschussenergie



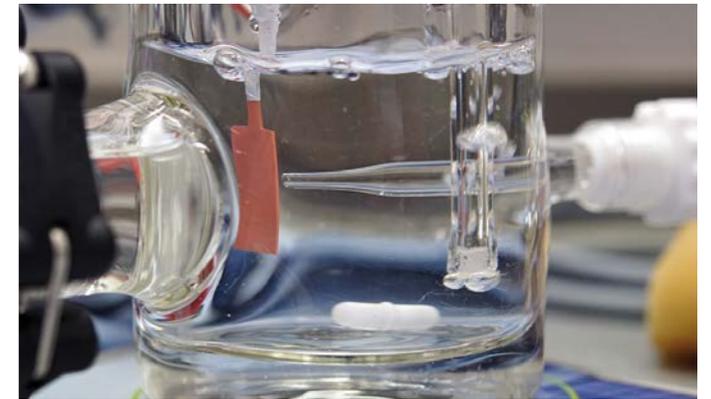
Ein großer Teil unserer Energie wird durch Verbrennungsprozesse erzeugt, bei denen klimaschädliches Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Der dadurch angestoßene Ausbau regenerativer Energiequellen wie Wind- und Solarenergie hat zu einer großen Menge an elektrischer Überschussenergie geführt, die je nach Tageszeit, Wetterbedingungen oder Jahreszeit starken Schwankungen unterliegt. Dieser Überschussenergie stehen jedoch keine ausreichenden Speichermöglichkeiten gegenüber. Vor diesem Hintergrund sucht man weltweit nach neuen Ansätzen. Was macht man mit dem CO₂? Lässt es sich gar als Rohstoff verwenden? Wie lässt sich die Überschussenergie nutzen?

Einer dieser Ansätze versucht, die beiden Themen zu verbinden. So werden bei der elektrochemischen CO₂-Reduktion aus elektrischer Energie und CO₂ verschiedene Produkte wie Kohlenwasserstoffe (Methan, Ethen), Kohlenstoffmonoxid, Formiat oder Alkohole erzeugt. Welches Produkt dabei am interessantesten ist, hängt maßgeblich von wirtschaftlichen Aspekten ab. Methan könnte ins Erdgasnetz eingespeist werden, angesichts der Erdgaspreise ist das aber nicht wirtschaftlich. Alkohole lassen sich auf anderen Wegen billiger erzeugen. Ethen wäre interessant, da es von der chemischen Industrie als wertvolles Ausgangsmaterial für Synthesen gefragt ist.

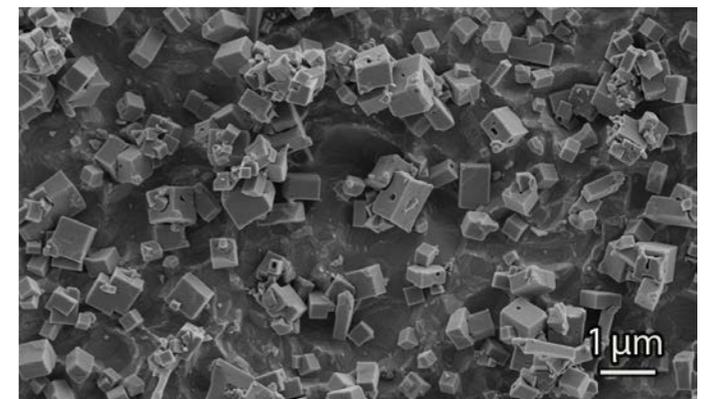
Durch die elektrochemische Reduktion von CO₂ soll dieses unter sinnvoller Nutzung von regenerativer Überschussenergie als Rohstoff erschlossen werden.

Das Prinzip des Verfahrens entspricht dem eines herkömmlichen Wasser-Elektrolyseurs. Bei diesem wird elektrische Energie aufgewendet, um an zwei Elektroden Wasser zu spalten. An der Anode bildet sich Sauerstoff (O₂) und an der Kathode Wasserstoff (H₂). Bei der elektrochemischen Reduktion von CO₂ bleibt die Reaktion an der Anode gleich, während an der Kathode CO₂ zu den gewünschten Produkten umgesetzt wird. Bevor so ein Prozess etabliert werden kann, müssen in der Grundlagenforschung viele Fragen bearbeitet werden. Wie kann die Produktverteilung gezielt gesteuert werden? Wie können unerwünschte Nebenreaktionen unterdrückt werden? Welche Katalysatoren sind geeignet und wie können diese über viele Betriebsstunden stabil gehalten werden? Es hat sich gezeigt, dass Katalysatoren auf Kupfer-Basis die Fähigkeit besitzen, CO₂ zu Kohlenwasserstoffen wie Ethen (C₂H₄) oder Methan (CH₄) umzusetzen. Die Herausforderung dabei ist, einen auf Kupfer basierenden Katalysator zu stabilisieren und ihn anschließend in eine industriell verwendbare Form zu bringen, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.

Neben dem Katalysator ist auch die Prozessführung von großer Bedeutung. Eine wichtige Rolle kommt dabei dem Einsatz einer Gasdiffusionselektrode zu. Dadurch kann mehr CO₂ direkt aus der Gasphase an die reaktive Grenzfläche transportiert werden als dies mit in Wasser gelöstem CO₂ möglich wäre. Mit solchen Elektroden lassen sich deutlich höhere Stromdichten erzielen und wichtige Erkenntnisse gewinnen, um den Einsatz in einer Pilotanlage vorzubereiten.



Die Kupferelektrode befindet sich im Kathodenraum. Hier wird das CO₂ gasförmig eingeleitet und das Arbeitspotential gemessen.



Katalytisch aktive Kristalle auf der Kupferoberfläche. Das Bild wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommen.

Material- und Prozessentwicklung für die Brennstoffzelle

Neue Schlüsselwerkstoffe und -komponenten

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der chemisch gebundene Energie in elektrische Energie umwandelt. Diese direkte Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser ist energieeffizienter im Vergleich zu Verbrennungsprozessen. Neben der (auto-)mobilen Verwendung nehmen stationäre Anwendungen zu, z.B. in Notstromaggregaten, in Heizungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung oder in Kombination mit elektrischen Speichern zur Stabilisierung von Stromnetzen bei schwankender Einspeisung aus regenerativen Stromquellen.

In dem durch die Bayerische Forschungstiftung geförderten Verbundprojekt ForOxiE² haben sich die ZET-Lehrstühle für Werkstoffverarbeitung, für Chemische Verfahrenstech-

nik und für Funktionsmaterialien der Universität Bayreuth mit der TU München, der FAU Erlangen-Nürnberg, der Hochschule Coburg sowie acht Unternehmen aus Bayern zusammengeschlossen, um Schlüsselwerkstoffe und Komponenten für die PEM- und SOFC-Brennstoffzelle zu entwickeln. Besondere Aufmerksamkeit gilt der katalytischen Spaltung von Sauerstoff und Wasserstoff in Ionen sowie deren Transport im Elektrolyt als innerer Antrieb der Brennstoffzelle. Die Brennstoffzelle wird in diesem Zusammenhang als ‚atmendes‘ System verstanden, da sie – ähnlich zu Lebewesen – Sauerstoff elektrochemisch in nutzbare Energie umwandelt.

Das Projekt bündelt Kompetenzen im Bereich Entwicklung neuer Materialkonzepte, wie platinarmer Katalysatoren,

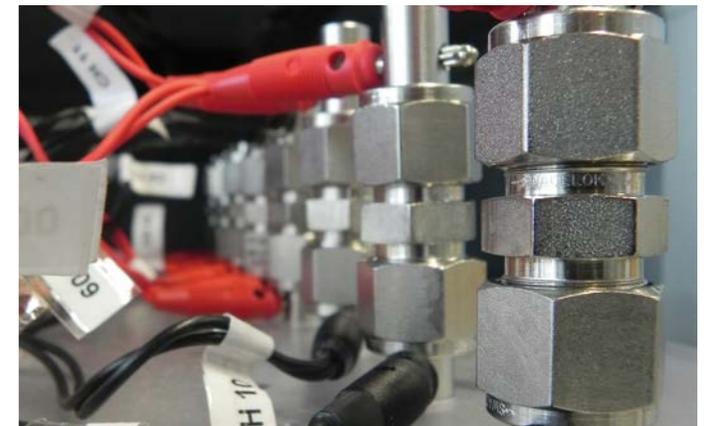
hierarchisch strukturierter Katalysatorträger, fluorfreier und verstärkter Polymermembranen sowie keramischer Elektrolyte, und Erprobung neuer Fertigungsprozesse wie der Aerosoldeposition oder der additiven Fertigung.

Im Labor erfolgt die Prüfung der entwickelten und eingesetzten Komponenten. Aufbauend auf jahrelanger Erfahrung und umfangreicher Messausstattung an der Uni Bayreuth bei der Charakterisierung elektrochemischer Systeme werden Funktionalität und Stabilität der neuen Materialien ermittelt. Flankierend werden Methoden für beschleunigte Alterungs- und Korrosionsuntersuchungen entwickelt und geprüft.

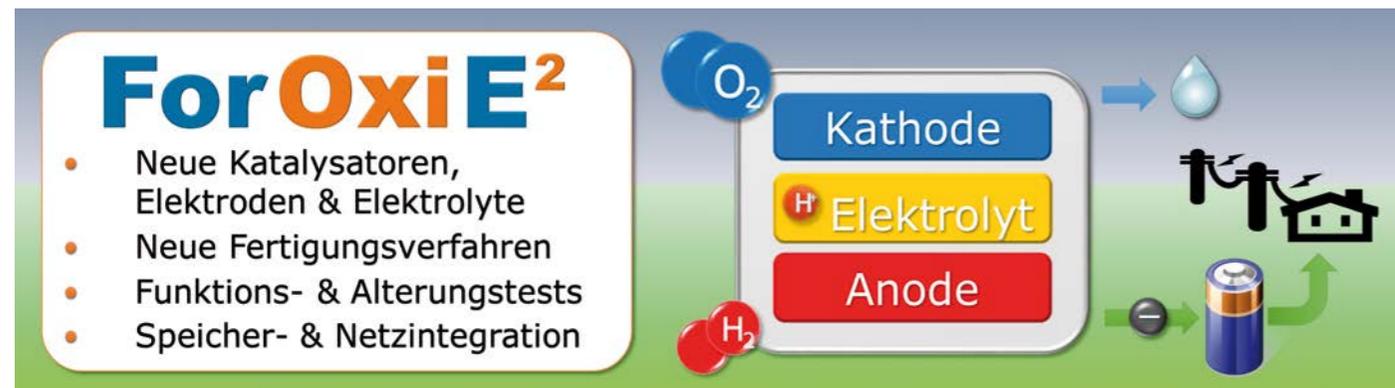
Auf Systemebene werden kombinierte elektrochemische Speicher und Wandler wie Batterie, Brennstoffzelle, Elektrolyseur und Wasserstoffspeicher hinsichtlich eines Einsatzes in dezentralen Stromversorgerstrukturen zur Stabilisierung von Stromnetzen mit schwankender Einspeisung aus regenerativen Energiequellen untersucht.



Brennstoffzellen-Test einer Elektroden-Membran-Einheit mit neuartiger Kompositmembran



Elektrochemische Zelltests im Labor



Die Brennstoffzellenforschung umfasst die Entwicklung neuer Materialien, neuer Fertigungstechnologien sowie Untersuchungen zur Alterung und Netzintegration

Dieses Forschungsgebiet wurde bis zu ihrem Tod im Dezember 2016 von Frau Prof. Monika Willert-Porada am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung vertreten.

Thermoelektrische Generatoren zur Nutzung von Abwärme

Das Material macht's – von der Abwärme zur elektrischen Energie



Die Energiewende ist eine der großen Herausforderungen für das Energiesystem in Deutschland. Dabei spielt vor allem die Steigerung der Energieeffizienz und die Vermeidung des CO₂-Ausstoßes eine entscheidende Rolle. Vor allem industrielle Anlagen nutzen teilweise nicht einmal die Hälfte ihrer eingesetzten Energie, so dass ein Großteil davon als Abwärme verloren geht. Doch Abwärme lässt sich nutzen.

Mit sogenannten thermoelektrischen Generatoren (TEG) ist es möglich, ungenutzte Abwärme direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Dabei werden, anders als bei alternativen Technologien, keine beweglichen Komponenten benötigt, so dass thermoelektrische Generatoren neben einer hohen Lebensdauer und geringen Wartungskosten auch vibrations- und geräuschlos betrieben werden können.

Der physikalische Effekt, der thermoelektrischen Generatoren zu Grunde liegt, ist der Seebeck-Effekt. Dieser besagt, dass sich an jedem Material, das einem Temperaturgradient ausgesetzt ist, eine Spannung, die sogenannte Thermospannung, ausbildet. Diese ist jedoch sehr gering und beträgt nur wenige Mikrovolt pro Kelvin Temperatur-

Modularer, rohrförmiger thermoelektrischer Generator (Demonstrator – hergestellt im Rahmen eines BMBF Verbundprojektes mit der Siemens AG, Merck KGaA, dem Lehrstuhl für Funktionsmaterialien und dem Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik, Universität Bayreuth)



unterschied. Durch spezielle Materialpaarungen und die Hintereinanderschaltung mehrerer thermoelektrischer Elemente können jedoch thermoelektrische Generatoren aufgebaut werden, die beispielsweise bei einem Temperaturunterschied von 500 °C und einer Modulgröße von



Verschiedene Formen synthetisch hergestellter thermoelektrischer Materialien

ca. 0,25 m² eine elektrische Ausgangsleistung von 600 Watt besitzen. Diese Leistung erscheint nicht groß, aber in Fällen, wo die Abwärme nicht anderweitig genutzt werden kann, wäre sie verloren. Zudem können mehrere Module prinzipiell zu größeren Einheiten zusammengeschlossen werden. Einheiten von der Größe eines Containers gibt es auf dem Markt. Die aktuellen TEG haben jedoch die Nachteile, dass sie einen geringen Wirkungsgrad aufweisen und die eingesetzten Materialien sowohl in der Herstellung als auch bei der Prozessierung oft sehr teuer und ökologisch nicht nachhaltig sind.

Genau hier setzt das ZET an und fokussiert seine Forschungstätigkeiten auf die Entwicklung und Optimierung kostengünstiger und hochverfügbarer thermoelektrischer Materialien, die einen nachhaltigen Einsatz erlauben. Dabei wird die gesamte Prozesskette bei der Entwicklung thermoelektrischer Generatoren betrachtet. Angefangen bei der Materialsynthese und kostengünstiger Prozessierung, über die Modellierung und Simulation des Gesamtsystems, bis hin zur Charakterisierung kompletter thermoelektrischer Module werden alle Optimierungsmöglichkeiten thermoelektrischer Generatoren im Auge behalten.

Mit dieser Herangehensweise konnten bereits in Kooperation mit Industriepartnern und Einrichtungen des ZET erfolgreich modular aufgebaute thermoelektrische Generatoren auf Basis flexibler Polymer-Oxid Verbundwerkstoffe und keramischer Materialien realisiert werden.

Klares Wasser – reines Öl

Energieeffiziente Phasentrennanlage für Schiffsabwässer



Technikumsanlage für die thermische Aufbereitung von Bilgenwasser

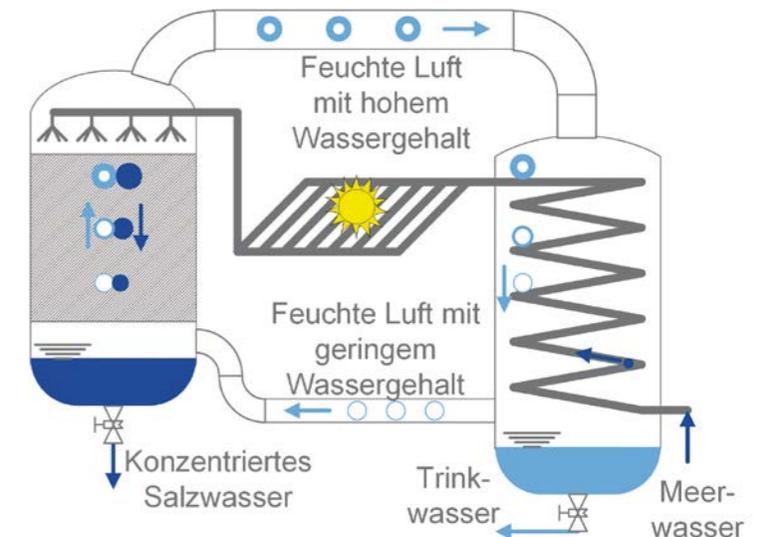
Nur ca. 3 % des globalen Wasservorkommens ist Süßwasser. Dem gegenüber stehen 97 % Salzwasser aus den Ozeanen. Schon jetzt zeigt sich in ariden Regionen die Bedeutung der Ressource Wasser nicht nur als Trinkwasser, sondern auch in der Landwirtschaft oder in Industrieprozessen. Doch auch in Industriestaaten wird vielerorts bereits versucht, unnötigen Wassereinsatz zu reduzieren und vorhandenes Abwasser aufzubereiten.

Das ZET baut derzeit ein Forschungsgebiet zu kombinierten Energie- und Wassersystemen auf. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Kopplung dezentraler Systeme auf Basis von thermodynamischen Kreisprozessen. Hierunter fallen zum Beispiel Prozesse, welche direkt über Wärme angetrieben werden. Die direkte Wärmenutzung hat den Vorteil, dass dabei selbst Wärme auf einem geringen Temperaturniveau, wie zum Beispiel aus Industrieprozessen, aus solarthermischen Kollektoren oder auch aus geothermischen Energiequellen, eingesetzt werden kann. Diese sogenannte „Niedertemperaturwärme“ kann derzeit vielfach nicht sinnvoll genutzt werden und geht daher meist als Abwärme an die Umgebung verloren. Einen weiteren, alternativen Weg gehen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ZET in einem Projekt mit einem mittelständischen Unternehmen aus der Region, der Karl Hopf GmbH.

Basierend auf einem Patent der Firma wird dabei mittels energieeffizienter Wärmepumpen Umgebungswärme auf ein Temperaturniveau von ca. 60 °C gehoben und damit eine Aufbereitungsanlage für Bilgenwasser betrieben.

Bilgenwasser fällt in Schiffen auf hoher See als Abfallstoff an und ist eine Mischung aus Salzwasser, Maschinenöl und Feststoffen. Derzeit wird diese Mischung nach einer ersten Aufbereitung in der Zementindustrie thermisch genutzt. Das Ziel der Forschungsarbeiten am ZET ist es hingegen, das wertvolle Öl aus dem Bilgenwasser abzutrennen und als Basisrohstoff für Recyclingöl zurückzugewinnen. Hierzu haben die ZET-Lehrstühle für Technische Thermodynamik und Transportprozesse und für Chemische Verfahrenstechnik eine Technikumsanlage aufgebaut, in der experimentell nachgewiesen werden soll, in wie weit die Konzentration der Ölphase erhöht werden kann und wie sich eine Wirtschaftlichkeit für solche Anlagen darstellen lässt. Die Technologie, die hinter der Anlage steckt, nennt sich Be- und Entfeuchtungsprozess. Dabei wird heiße Luft durch direkten Kontakt mit dem Bilgenwasser gesättigt, also mit Wasser „beladen“, und die feuchte Luft anschließend an einer kalten Oberfläche abgekühlt, wobei sich das Wasser verflüssigt und somit abgetrennt werden kann. Der Prozess ähnelt daher dem natürlichen Wasserkreislauf aus Verdunstung über den warmen Ozeanen, Wolkenbildung in kalten Bergregionen und anschließendem Regen.

Es laufen zudem Bestrebungen, das Konzept der Anlage so anzupassen, dass es zukünftig auch möglich sein wird, Meerwasserentsalzung und Aufbereitungsanlagen für industrielle Abwässer auf Basis dieser Technologie zu betreiben. Das ZET erkennt daher schon jetzt die zunehmende Bedeutung der Ressource Wasser und liefert frühzeitig einen Beitrag zu ressourceneffizienten Wasser- und Energiesystemen.



Oben: Anlagenschema einer solaren Meerwasserentsalzung. Unten: In der Mitte der Ausgangsstoff Bilgenwasser, links die gewünschte reine Ölphase und rechts reines Wasser

Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe als chemische Energiespeicher

Erzeugung CO₂-neutraler Kraftstoffe mit Hilfe von Sonnenenergie

In Zukunft sollen Wind- und Solarenergie in Deutschland einen erheblich größeren Beitrag für eine umwelt- und klimafreundliche Energieversorgung leisten. Bereits heute liegt der Beitrag von Windkraft- und Photovoltaikanlagen an der deutschen Stromerzeugung bei rund 30 % (2015). Für den zukünftig angestrebten deutlichen Ausbau erneuerbarer Energien ist jedoch entscheidend, dass die zeitlich fluktuierende Stromerzeugung aus Sonne und Wind effizient genutzt wird. Das ZET arbeitet an einer innovativen Lösung für die Speicherung und den Transport von Energie, nämlich der Nutzung von flüssigen Kohlenwasserstoffen als chemische Energiespeicher.



Flüssige Kraftstoffe wie Dieselöl oder Flugturbinenkraftstoff (Kerosin) können aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften einen wesentlichen Beitrag zur Lösung der Speicher- und Transportfrage leisten. Zum einen sind sie bei Umgebungsbedingungen flüssig und benötigen daher keine speziellen Lager- oder Transportbehälter; zum anderen besitzen sie die höchste verfügbare Speicherdichte (siehe Tabelle): Die Energie, die z.B. in Dieselöl pro Kubikmeter gespeichert werden kann, ist beispielsweise

Bereits seit über 60 Jahre werden in Südafrika mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe erzeugt.

30-mal höher als bei derzeitigen Batterien. Besonders im Bereich großtechnischer Anwendungen und für den Betrieb von Flugzeugen wird die Nutzung von Batterien als Energiespeicher auch in Zukunft kaum eine Rolle spielen.

Vor diesem Hintergrund hat in jüngster Zeit ein Forschungsansatz an Bedeutung gewonnen, der auf die Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Wasserstoff und Kohlendioxid abzielt. Dieser Ansatz ist in doppelter Hinsicht zukunftsweisend:

- Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen wie Kohle und Erdgas befeuert werden, haben einen hohen Ausstoß an CO₂-haltigen Abgasen. Das Kohlendioxid aus diesen industriellen Prozessen, die zumindest mittelfristig, d.h. in der Übergangsphase von fossilen zu regenerativen Energieträgern, unentbehrlich sind, lässt sich für die Erzeugung flüssiger Kraftstoffe nutzen. Das bedeutet vereinfacht gesagt: Die weitgehend auf fossilen Rohstoffen wie Kohle und Erdgas basierenden Kraftwerke, die heute für etwa 50 % der globalen CO₂-Emission verantwortlich sind, könnte man „CO₂-neutral“ gestalten. Die CO₂-Gewinnung aus industriellen Abgasen ist dabei sehr interessant, da es für die Energiewirtschaft derzeit noch nicht möglich ist, CO₂ auf rentable Weise direkt aus Luft zu gewinnen.

- Windkraft- und Photovoltaikanlagen erzeugen oftmals Strom, der nicht unmittelbar benötigt wird. Diese elektrische Energie kann genutzt werden, um durch Wasserelektrolyse Wasserstoff zu erzeugen – die zweite Komponente,

| Stoff | Volumen zur Speicherung von 10 MWh elektrischer Energie (entspricht 5 Std. Volllast einer typischen Windkraftanlage) |
|--------------------------------------|--|
| Dieselöl | 1 m ³ |
| komprimiertes Erdgas (200 bar, 20°C) | 4 m ³ |
| kompr. Wasserstoff (700 bar, 20°C) | 6 m ³ |
| Li-Ionen-Batterie | 30 m ³ |
| komprimierte Luft (20 bar) | 3.400 m ³ |
| Wasser (Pumpspeicher, Höhe 300 m) | 14.000 m ³ |

Energiedichten von Stoffen/Systemen zur Speicherung elektrischer Energie.

die für die synthetische Herstellung flüssiger Kraftstoffe benötigt wird.

Um flüssige Kraftstoffe aus regenerativem Wasserstoff und CO₂ zu erzeugen, ist ein mehrstufiger Prozess notwendig. Im ersten Verfahrensschritt wird CO₂ mit Wasserstoff nach der reversen Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS) in ein Gasmisch überführt, das im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht. Das Gasmisch wird anschließend nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren (FTS) in flüssige Kohlenwasserstoffe umgesetzt. Diese beiden Prozessschritte zu analysieren und sie in technischer wie in wirtschaftlicher Hinsicht zu optimieren, ist das Ziel aktueller Forschungsarbeiten am ZET; die Arbeiten reichen dabei von der Grundlagenforschung bis hin zur Simulation eines Gesamtprozesses.

Energie mittels Biologie: Mehr als nur Strom

Wie Mikrobielle Brennstoffzellen neben Strom auch sauberes Wasser herstellen

Unter Erneuerbare Energiequellen gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, die benötigte elektrische Energie über Wind, Solar und Geothermie zu beziehen. Dabei sind Solar und Wind abhängig von den meteorologischen Bedingungen. Die Sonne scheint nur am Tag, Wind ist nicht konstant vorhanden. Energie, gewonnen mittels Biologie, ist dagegen jederzeit verfügbar und reinigt das Abwasser.

Neben Biogas können auch Mikrobielle Brennstoffzellen (MBZ) einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leisten. Ähnlich wie konventionelle Brennstoffzellen erzeugen sie durch Oxidationsreaktionen Strom. Statt mit reinem Wasser- und Sauerstoff können sie aber auch mit

Luft und nährstoffhaltigem (Ab)wasser betrieben werden. Eine MBZ besteht aus zwei Halbzellen die elektrisch miteinander verbunden sind. In der ersten Halbzelle mit der Anode befinden sich Mikroorganismen, welche die vorhandenen Nährstoffe im Abwasser abbauen. Bestimmte Mikroorganismen wie *S. oneidensis* MR-1 sind dabei in der Lage Elektronen und Protonen an ihre Umgebung abzugeben. Die Elektronen wandern über den elektrischen Leiter zur anderen Halbzelle mit der Kathode. Die Protonen (H^+ -Ionen) diffundieren durch eine kationenselektive Membran ebenfalls von der anodischen Halbzelle zur Kathode und reagieren dort mit den Elektronen und Sauerstoff aus der Luft zu Wasser. Somit werden drei wichtige Produkte erhalten: Das Abwasser wird durch die MBZ gereinigt, es

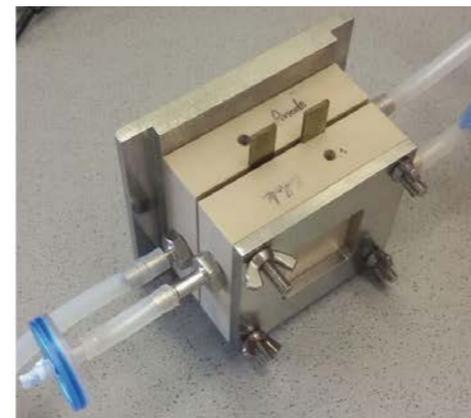
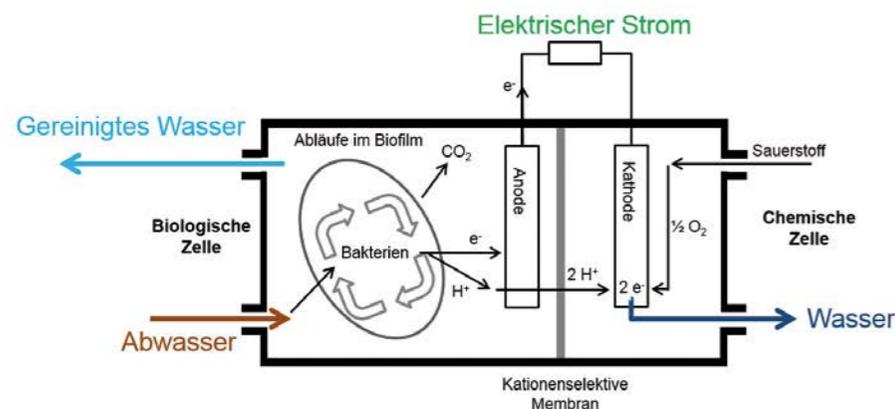
wird elektrischer Strom produziert und es entsteht zusätzlich reines Wasser auf der Kathodenseite.

Da nur wenige Mikroorganismen in der Lage sind Elektronen aus ihrem Energiestoffwechsel direkt oder über Mediatoren an Elektroden weiterzuleiten, muss der Aufbau einer MBZ darüber hinaus so konzipiert sein, dass ein steriles Arbeiten möglich ist, um zu verhindern, dass andere Keime die stromproduzierenden Organismen überwachsen. Dies schränkt den Einsatzbereich der MBZ derzeit noch stark ein. Ein weiteres Problem ist die Maßstabsvergrößerung von MBZs, die bislang mit hoher Leistungsdichte nur im Milliliter-Maßstab funktionieren.

Mit diesen Problemstellungen befasst sich das ZET im Rahmen des 4. Teilprojekts des Verbunds „Ressourcenschonende Biotechnologie in Bayern – BayBiotech“ sowie des Forschungsprojekts FOR 10'000. Wir fragen uns:

- Wie können gezielt Mikroorganismen von definierten Spezies im Umweltbereich eingesetzt werden, ohne dass diese ausgewaschen werden? (BayBiotech)
- Welche Geometrien können für die Maßstabsvergrößerung eingesetzt werden? (BayBiotech)
- Kann die MBZ auch als Biosensor in der Umwelttechnik verwendet werden? (FOR 10'000)

Das Teilprojekt 4 „Biofilme für die Prozessintensivierung“ wird durch das Bayerische Ministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz finanziert und FOR 10'000 durch die



Links, Schema einer Mikrobiellen Brennstoffzelle zur Herstellung elektrischer Energie und Wasser; rechts, Aufbau am ZET



Messaufbau der MBZ am ZET

Bayerische Forschungstiftung gefördert. Dazu stehen am ZET eine MBZ mit Peripherie (Messstand mit Potentiometer, Verstärker und Gasanalyse) zur Verfügung, um die erreichten Stromdichten zu messen, sowie Bildung von entstandenen Produkte auf der Anoden/Kathodenseite zu charakterisieren.

FOR10'000: Power aus der Biotonne

Wie lässt sich diese Idee wirtschaftlich und dabei nachhaltig verwirklichen?

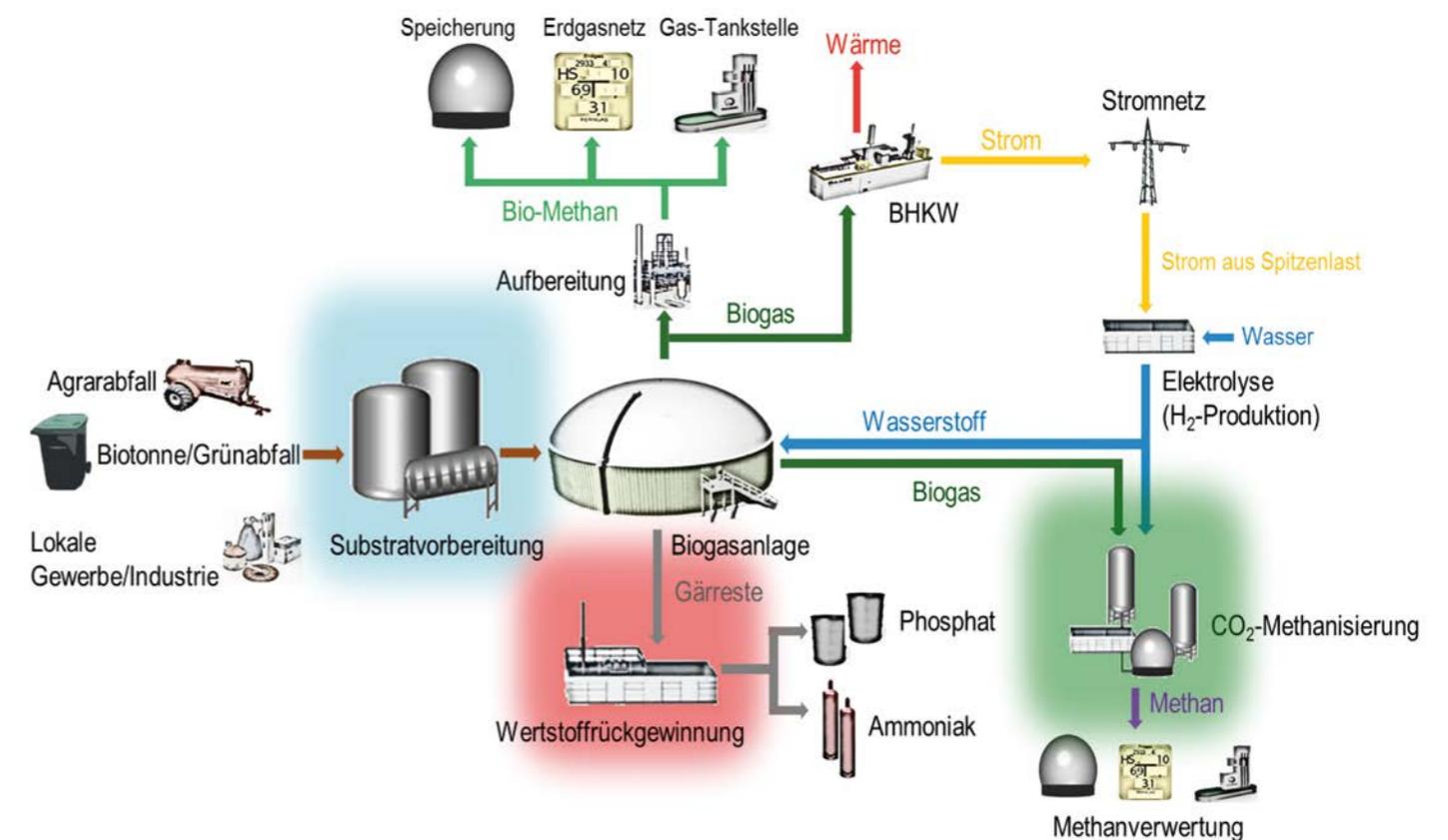
Die Biotonne ist in Deutschland fest etabliert. Doch was macht man am besten mit dem Inhalt? Die Kompostierung stellt eine mögliche Form der Verwertung dar, die vor allem die Wertstoffe aus dem organischen Material optimal rezykliert. Die Verbrennung wird ebenfalls diskutiert. Sie ist kostengünstig und erzeugt nutzbare Wärme. Allerdings werden dabei viele Wertstoffe mitverbrannt.

Eine Nutzungsvariante, die beides kann, ist die biologische Vergärung. Das entstehende Biogas, eine Mischung aus Kohlendioxid und Methan, kann energetisch genutzt werden, die zurückbleibenden Gärreste könnten nach einer Qualitätskontrolle – ähnlich wie beim Kompost – wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. In großen Städten funktioniert das bereits sehr gut, im ländlichen Raum hingegen scheitert das Konzept an wirtschaftlichen Überlegungen. Warum ist das so und wo sind mögliche Ansätze diese Situation zu verbessern? Dieser Frage widmet sich das von der Bayerischen Forschungsförderung geförderte Projekt „FOR10'000“.

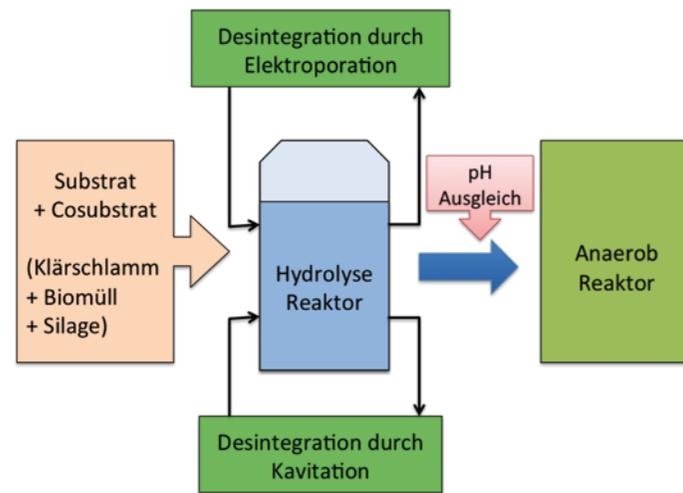
Projektpartner aus Wissenschaft und Industrie wollen gemeinsam ausloten, wie organische Abfälle auch in kleineren Städten und ländlichen Regionen optimal im Sinne einer Kreislaufwirtschaft verwertet werden können. Seitens der Universität Bayreuth bringt das Zentrum für Energietechnik mit seinem Lehrstuhl für Bioprozesstechnik, dem auch die Koordination des Projektes obliegt, auch die speziellen Kompetenzen in der Energieforschung

und Energietechnik von drei weiteren ZET-Lehrstühlen in FOR10'000 ein. Darüber hinaus sind Partner von der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden sowie den zwei TAO-Hochschulen für Angewandte Wissenschaften Coburg und Hof beteiligt. Für die konkrete Umsetzung sorgen kleine und mittlere Unternehmen – sei es aus dem Anlagenbau oder der Energie- Gas- und Materialtechnik – sowie einige Betreiber von Biogas-, Klär- und Kompostieranlagen.

Ausgangshypothese von FOR10'000 ist, dass es nach dem derzeitigen Stand von Forschung und Technik möglich sein sollte, auch kleinere Anlagen wirtschaftlich zu betreiben, wenn statt einer Optimierung von Einzelkomponenten konsequent das Gesamtsystem betrachtet wird. Der Fokus von FOR10'000 liegt auf dem ländlichen Raum und kleinen bis mittleren Anlagen. Als Beispiel dient die Region Bayreuth mit ihrer spezifischen Infrastruktur. Durch eine gekoppelte Betrachtung von elektrischen, thermischen und stofflichen Energieflüssen wird eine technoökonomische Modellierung des Gesamtsystems möglich, wie sie derzeit außerhalb der rein elektrischen Systeme („Smart Grids“) noch kaum verfolgt wird. Dabei wird das Gesamtsystem unter Verwendung von realen Daten sowie Rand- und Rahmenbedingungen (z.B. des Energiemarktes) abgebildet. In vier Bereichen werden zusätzlich experimentelle Daten gesammelt und in die Modellierung gegeben. Dies sind die *Substratvorbereitung*, die *Biogasveredelung*, die Nutzung der *Gärreste* und die *Bioelektrochemie*.



Gesamtsystem mit experimentellen Schwerpunkten



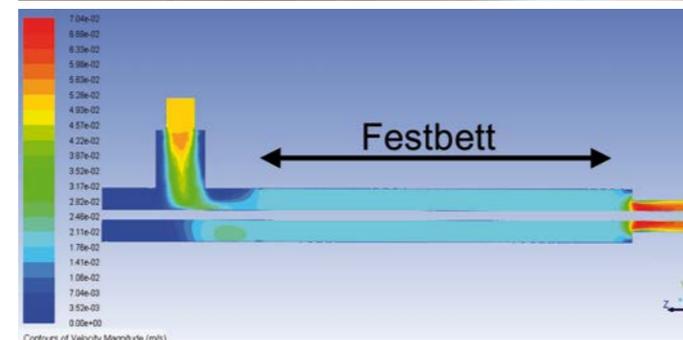
Konzept der Substratvorbereitung; Fachhochschule Hof (Prof. A. Schmid).

Eine Bioabfallvergärungsanlage muss mit einem deutlich variablen Substratmix auskommen als die gängige landwirtschaftliche Anlage. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist oft die anfängliche Hydrolyse. Im Arbeitsbereich Substrate werden Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch eine geeignete (mechanische, chemische, biologische) Substratvorbereitung untersucht. Kriterien für die Beurteilung sind chemische Zusammensetzung, Gärversuche, sowie die Zusammensetzung der Gärmikro-

Rohrreaktor für bioelektrochemische Umsetzungen (oben) und zugehörige fluiddynamische Simulation (unten).

biologie. Die erhaltenen Daten werden in die Modellierung des Gesamtsystems eingebracht. Dabei soll nicht eine „ideale“ Möglichkeit gefunden, sondern eine fallbezogene Entscheidungsgrundlage geschaffen werden.

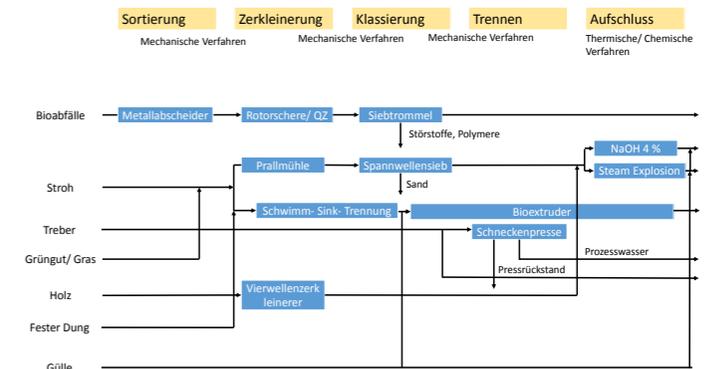
Die Veredelung von Biogas zu Biomethan stellt eine der attraktivsten Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirt-



schaftlichkeit von Vergärungsanlagen dar, da so eine direkte Nutzung als stofflichen Energieträger (öffentlicher Nahverkehr, Landwirtschaft, Einspeisung ins Gasnetz) möglich wird. Allerdings liegt hier der Mindestmaßstab für Wirtschaftlichkeit noch einmal deutlich höher als bei der Vergärung generell, vor allem, wenn das CO₂ lediglich durch eine Gaswäsche entfernt wird. In FOR10'000 werden stattdessen Möglichkeiten zur chemischen (Sabatier Prozess), biologischen (hydrogenotrophe Methanisierung) und bioelektrochemischen Umsetzung des CO₂ zu Methan untersucht.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Nutzung der Gärreste im Sinne einer echten Kreislaufwirtschaft. Organische Abfälle enthalten Wertstoffe wie Phosphat, Stickstoff, Mineralien oder organische Fasern, die wesentlich zur Fruchtbarkeit von Böden beitragen. Hier sollen möglichst kostengünstige Verfahren der Rückgewinnung etabliert werden. Neben der Wertstoffrückgewinnung steht die Definition von Qualitätsstandards (Gütesiegel) im Fokus.

Auch wenn sich das Forschungsprojekt an vielen Stellen mit Detailfragen der technologischen und wirtschaftlichen Optimierung befasst, geht es letztlich darum, leistungsstarke kleine und mittlere Biogas-Anlagen in kommunale Gesamtsysteme der Energieversorgung und Abfallverwertung zu integrieren. FOR10'000 versteht sich daher nicht nur als wissenschaftliches Vorhaben, sondern will überdies einen Weg zu innovativen öffentlichen Dienstleistungen bahnen, die konkret zur Energiewende beitragen.



Abfolge der Verfahrensschritte zur Vorbehandlung unterschiedlicher Rohstoffe [Rainer Sturm/Pixelio]

An diesem Forschungsprojekt sind folgende Lehrstühle beteiligt:

- Lehrstuhl für Bioprozesstechnik, Prof. Dr. Ruth Freitag
- Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik, Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess
- Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse, Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann
- Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung, Prof. Dr. Willert-Porada †

Bildnachweise und Quellenverzeichnis

Alle Abbildungen stammen – sofern im Folgenden nicht anders angegeben – von den jeweiligen Lehrstühlen.

Titelseite:
Fotograf Peter Kolb, Bayreuth, Nachbearbeitung Andreas Gaube, Bayreuth

S. 8:
(links oben) Fotograf Jürgen Schabel / © Universität Bamberg;
(mitte oben) Gebäude FAN C, © Universität Bayreuth;
(mitte oben, 2. Bild) Coburg Campus, Fotograf Friedrich Streib;
(links unten) Campus, © Universität Bayreuth;
(rechts oben) Kapuzinerstraße, © Universität Bamberg;
(rechts unten, oberes Bild) Coburg Campus Design;
(rechts unten, unteres Bild) Campus Hochschule Hof

S. 10:
Fotograf Peter Kolb, Bayreuth

S. 11:
Zeichnung Außenansicht: Fritsch + Tschaidse Architekten GmbH, München

S. 13:
(links oben) enolcon GmbH

S. 16:
(links oben und rechts unten) Schuster Pechtold Schmidt

S. 20:
(Diagramm links oben) Jung-Ki Park: Principles and Application of Lithium Secondary Batteries. Weinheim, Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012 – ISBN 978-3-527-33151-2, David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook of Batteries. 4. Auflage, McGraw-Hill Education Ltd, 2010 – ISBN 978-0071624213

S. 24:
(links oben) Tim Reckmann/Pixelio; (rechts unten) Pixabay

S. 26:
(links oben) Rainer Sturm/Pixelio;
(links unten) Tim Reckmann/Pixelio

S. 27:
(rechts) Wikipedia, CC BY-SA 3.0, R. Dervisoglu

S. 38:
(links) Die Bilder entstanden im Rahmen des BMBF-Projekts bei einem Projektpartner.

S. 42:
(unten) „Secunda bei Nacht“, Firma Sasol, Südafrika

S. 49:
(rechts oben) Rainer Sturm/Pixelio

S. 51:
Fotograf Peter Kolb, Bayreuth



Im TAO-Gebäude der Universität Bayreuth

Zentrum für Energietechnik (ZET)
Universität Bayreuth
Prof.-Rüdiger-Bormann-Straße 1
95447 Bayreuth

Telefon +49 921 – 55 68 01
Fax +49 921 – 55 68 02
zet@uni-bayreuth.de
www.zet.uni-bayreuth.de

