

Hamburg als Modellregion für ein neues Energieversorgungssystem

In ihrem Energiekonzept strebt die Bundesregierung an, den Ausstoß von Treibhausgasen drastisch zu reduzieren – bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 Prozent gegenüber dem Stand von 1990. Dieses ehrgeizige Ziel lässt sich nur erreichen, wenn Erneuerbare Energien optimal in das deutsche Energieversorgungsnetz eingebunden werden. Anhand der Modellregion Hamburg wollen Forscher der TU Hamburg ein solches Szenario simulieren.

Im Projekt „TransientEnt.EE“ wird das „transiente Verhalten von gekoppelten Energienetzen“ betrachtet, wobei ein großer Teil der Energie aus Erneuerbaren Quellen stammen soll. Transient bedeutet, dass es hier um Abläufe geht, bei denen sich die einzelnen Parameter im Zeitverlauf ständig verändern. Bezogen auf das Energieversorgungssystem gibt es dafür eine Reihe von Beispielen: Im Winter muss mehr geheizt werden als im Sommer. Photovoltaikanlagen liefern nur tagsüber Strom und die Industrie benötigt immer dann punktgenau Energie, wenn sie ihre Produktion hochfährt. Die Erzeugung von Wärme und Strom hängt dabei oft direkt zusammen, etwa bei gasbetriebenen Blockheizkraftwerken. Von „gekoppelten“ Energienetzen spricht man, weil die Strom-, -Wärme- und Gasnetze miteinander verbunden sind.

„TransiEnt.EE“ wird vollständig vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert. Daran beteiligt sind die TUHH-Professoren Günter Ackermann vom Institut für Elektrische Energiesysteme und Automation, Alfons Kather vom Institut für Energietechnik und Gerhard Schmitz vom Institut für Thermofluidynamik, gleichzeitig Projektkoordinator. Als Modellregion haben die Projektpartner Hamburg ausgewählt, die Stadt mit dem höchsten Energieverbrauch in Norddeutschland. Gleichzeitig ist die Metropole an der Elbe stark abhängig

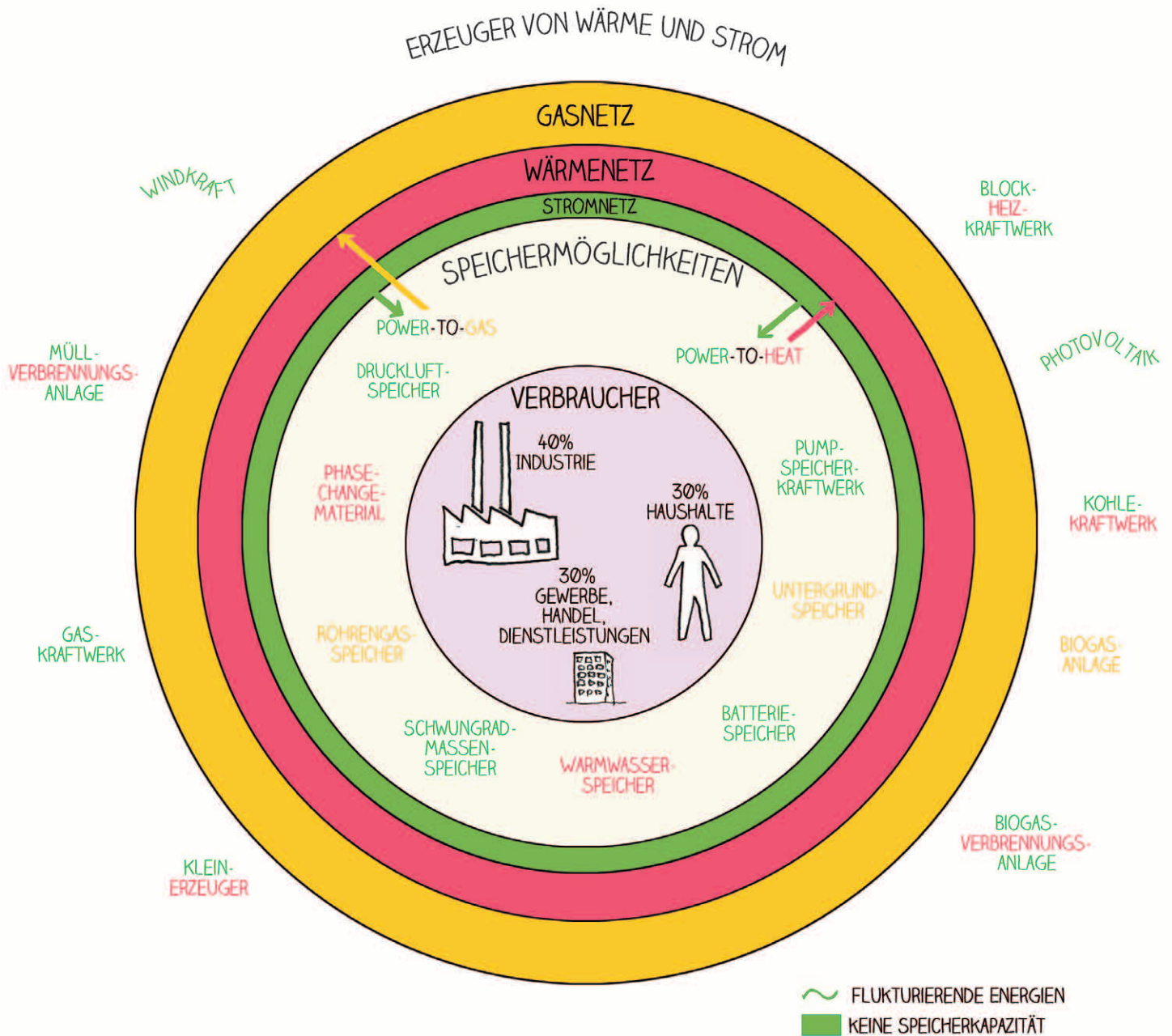
von Energieimporten – mehr als 75 Prozent des Stroms kam 2013 aus den umliegenden Bundesländern. Selbst durch den Ausbau von Erneuerbaren Energien wird sich daran wenig ändern. Denn Hamburg hat zum Beispiel kaum Möglichkeiten, neue Windkraftanlagen aufzustellen. Ganz anders sieht es beim Nachbarn Schleswig-Holstein aus. Bereits heute produzieren die Anlagen dort einen Stromüberschuss, wenn der Wind kräftig weht. In dieser Situation können die Verbraucher in Hamburg eine wichtige Rolle spielen, indem sie den überschüssigen Strom abnehmen.

Ziel des Projekts an der TUHH ist eine Simulation, in der das gesamte Energieversorgungssystem vom Erzeuger über die Netze bis zum Verbraucher so gesteuert wird, dass trotz Aufnahme der fluktuierenden Energien aus Windkraft und Photovoltaik die Zuverlässigkeit der Energieversorgung gewahrt bleibt. Vor allem die Industrie ist darauf angewiesen, große Mengen an Energie aus dem Netz ziehen zu können, wie etwa der Stahlhersteller ArcelorMittal im Hamburger Hafen. Gleichzeitig sollen der Ausstoß von klimaschädlichem CO₂ sinken und außerdem der Kostenanstieg der zukünftigen Energieversorgung begrenzt werden.

Zurzeit erstellen die Doktoranden Lisa Andresen, Pascal Dubucq und Ricardo Peniche eine softwarebasierte Modell-Bibliothek. Die Programmiersprache eignet

sich besonders für dynamische und fachübergreifende Systeme. In dem erstellten Modell des Energieversorgungssystems sind die verschiedenen Erzeuger, Verbraucher, Netze und Speicher vertreten. Große Mengen an Daten von diesen Akteuren, die die Hamburger Forscher bis 2016 zusammentragen müssen, bilden die rechnerische Basis dieser Simulationen. Damit können die Nachwuchswissenschaftler die einzelnen Komponenten kombinieren und miteinander verbinden, so werden sie die Szenarien zeitlich aufgelöst für ein ganzes Jahr untersuchen.

Sobald mit diesem Modell der Ist-Zustand beschrieben werden kann, werden vier Szenarien für eine Energieversorgung der Zukunft genauer erforscht. Im ersten Szenario untersucht Lisa Andresen, unter anderem wie mit Strom aus Erneuerbarer Energie über einen chemischen Prozess Wasserstoff hergestellt werden kann. Bei diesem so genannten Power-to-Gas-Verfahren kann Gas anschließend im Erdgasnetz gespeichert werden. Windkraftanlagen müssten dann nicht sofort abgestellt werden, wenn sie einen Überschuss an Strom produzieren. Stattdessen ließe sich die Energie in anderer Form nutzen. Möglich ist auch, dass der so erzeugte Wasserstoff mit einer hohen Energiedichte gespeichert wird und somit variabel einsetzbar ist, beispielsweise als chemisches Produkt in industriellen Prozes-



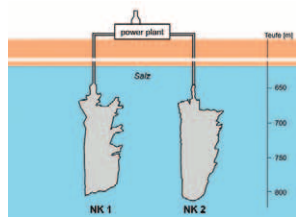
sen oder als Brennstoff für Kraftwerke, in Verbrennungsmotoren und für die direkte Rückverstromung in Brennstoffzellen. Eine Alternative zum Power-to-Gas-Verfahren sind Anlagen, die den Strom direkt in Wärme umwandeln (Power-to-Heat). Bei dieser Technologie treten weniger energetische Verluste auf als bei der Umwandlung von Strom in Gas. Beide Systeme können flexibel zum Einsatz kommen, je nachdem

ob neben dem Stromüberschuss gerade ein Bedarf an Wärme besteht. Das zweite ebenfalls von der Doktorandin untersuchte Szenario geht von einer dezentralen Energieversorgung aus, in der kleinere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Strom und Wärme bereitstellen (siehe Grafik S. 20). Diese haben den Vorteil, dass sie schnell und flexibel auf das wechselnde Angebot an Erneuerbarer Energie und einen schwanken-

den Bedarf der Verbraucher reagieren können. Im dritten Szenario beschäftigt sich Pascal Dubucq mit der Möglichkeit, Verbraucher von Strom je nach Angebotslage der erneuerbaren Energie zu steuern. Zum Beispiel würde ein Industriebetrieb seine Produktion in Zeiträume verschieben, in denen genügend Windkraft produziert werden kann. Im vierten Szenario, das Ricardo Peniche untersucht, werden die Betriebsweise und Steue-



Batteriespeicher



Druckluftspeicher



Phase-Change-Material-Speicher



Pumpspeicher

Speichern – Aber wie ?

Eine große Herausforderung für die Stromnetze der Zukunft sind die stark fluktuierenden Energieströme, die durch erneuerbare Quellen entstehen. Denn Strom lässt sich nicht direkt speichern. Wenn er nicht sofort verbraucht wird, muss die elektrische Energie deshalb in andere Energieformen umgewandelt werden – zum Beispiel in chemische, thermische oder potenzielle Energie. Allerdings gibt es auch Verfahren, die elektrische Energie nutzen, um Wärme oder Gas zu gewinnen. Einige dieser Technologien werden im Folgenden vorgestellt.

Stromspeicher

Wenn Pumpen Wasser aus einem tiefen in ein höher gelegenes Reservoir leiten, spricht man von einem **Pumpspeicher-Kraftwerk**. Später kann das Wasser herabgelassen werden und eine Turbine antreiben, die Strom erzeugt.

Wird ein Gerät an eine **Batterie** angeschlossen, können Elektronen von einem Pol der Batterie zum anderen wandern, es entsteht ein Stromfluss. Bei einem **Akkumulator** – kurz Akku – ist dieser Prozess umkehrbar: Strom fließt in den Akku, die elektrochemische Reaktion im Inneren lädt ihn wieder auf.

In **Druckluftspeicher-Kraftwerken** wird Luft durch einen elektrischen Kompressor verdichtet und in einen Speicher gepresst. Während des Entladens entspannt sich die Luft und wird in einer Gasturbine genutzt, die Strom produziert.

Bei **Schwungrad-Massenspeichern** fließt Strom in einen Motor, der Schwungräder in Bewegung setzt. Aus elektrischer Energie wird so kinetische Energie. Der Prozess wird rückgängig gemacht, wenn ein Generator die Räder wieder abbremst.

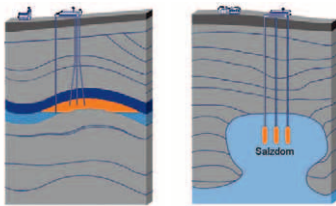
Ein **Elektrolyseur** ist eine Technologie, die Wasser mithilfe des eingespeisten Stroms in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff spaltet. Der Wasserstoff kann dann direkt gespeichert oder in das Erdgasnetz eingespeist werden. Dieses Verfahren nennt sich **Power-to-Gas**. Das **Power-to-Heat-Verfahren** wandelt die elektrische Energie in thermische statt in chemische Energie um, indem Wasser oder andere Medien erwärmt werden. Damit steht die Energie zum Beispiel für Fernwärmenetze zur Verfügung.

Gasspeicher

Der Energieträger Gas kann zum Heizen genutzt werden oder zur Gewinnung von Strom, wenn es im Kraftwerk verbrannt wird. Um Gas effektiv zu speichern, wird es meist stark zusammengepresst. Anschließend wird es in Röhren-, **Poren- und Kavernenspeicher** geleitet. So lässt sich das Gas unterirdisch auf relativ kleinem Raum lagern.

Wärmespeicher

Der **Warmwasserspeicher** folgt einem sehr einfachen Prinzip: Wasser nimmt Wärme, also thermische Energie, auf und gibt sie zu einem späte-



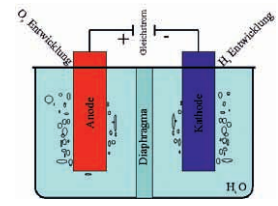
Porenspeicher



Warmwasserspeicher



Schwungradmassen-Speicher



Wasser-Elektrolyse

ren Zeitpunkt wieder ab. Das passiert auf einem Temperaturniveau, auf dem noch kein Dampf entsteht, der Aggregatzustand des Wassers bleibt also der gleiche.

Phase-Change-Materialien hingegen speichern Wärme, oder geben sie ab, indem sie ihren Aggregatzustand ändern. Ein Beispiel aus dem Alltag sind kleine Gelkissen als Handwärmer; in denen Salze zunächst durch Wärme geschmolzen werden und diese durch Erstarren wieder frei setzen.

Electricity Storage

If pumps pipe water from a lower to a higher reservoir; it is referred to as a **pumped storage power station**. The water can later be released to drive a turbine.

If a device is connected to a battery, electrons can pass from one of its poles to the other; creating a current flow. In an accumulator or storage battery this process is reversible. Electricity flows into the battery and the electrochemical reaction inside it recharges it.

In compressed air power stations an electric compressor condenses the air and presses it into a storage unit. When the compressed air is released, tension is relaxed and the air is used in a gas turbine that generates electricity.

In flywheel mass storage electricity flows into a motor that powers flywheels, converting electrical into kinetic energy. The process is reversed when a generator slows the flywheels down.

An electrolyzer is a technology that uses the electricity to split water into its components oxygen and hydrogen. The hydrogen can then be either stored directly or fed into the natural gas grid. This process is known as Power-to-Gas.

The Power-to-Heat process converts electric power into thermal rather than chemical energy by heating water or other media. The energy can then be used for district heating, for example.

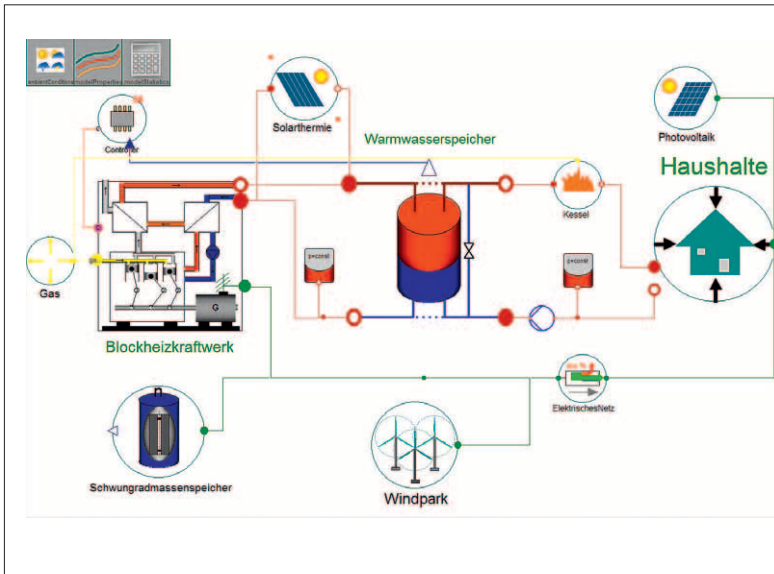
Gas Storage

Gas can be used directly for heating or to generate electricity in a power station. For effective storage, gas is usually highly compressed and then kept in pipe, pore and cavern storage facilities. In this way gas can be stored underground in a relatively small space.

Heat Storage

Hot water storage is based on a very simple principle. Water absorbs heat, i.e. thermal energy, and releases it again later. This is done at a temperature at which steam is not yet generated, so the physical state of the water remains the same.

Phase change materials, in contrast, store heat or release it by changing their physical state. The small gel cushions that are used as hand warmers are an example from everyday life. Salts are first molten in them by means of heat that is released when they solidify.



Diese schematische Darstellung zeigt die dezentrale Versorgung eines Haushaltes mit Wärme und Strom. Dem zugrunde liegt eine ganzheitliche Betrachtung des Strom-, Gas- und Wärmenetzes der TUHH-Wissenschaftler, die neu ist und Optimierungspotenziale bei der Energieversorgung aufdecken soll. Denkbar ist, den Anteil an Erneuerbaren Energien (Solarthermie, Windpark, Photovoltaik) an der Stromversorgung durch entsprechende Steuerung eines Blockheizkraftwerkes sowie eines Schwungradmassenspeichers (Strom) und Warmwasserspeichers (Wärme) zu erhöhen.

This diagram shows the local heat and electricity supply to a household. Based on an integrated approach to the electricity, gas and heating network by TUHH scientists, it is a new view designed to identify optimization potential for energy supplies. The proportion of renewables (solar heating, wind farms, and photovoltaics) in the power supply might conceivably be increased by controlling a combined heat and power station, a flywheel energy storage (electricity) and a hot water storage system (heat).

rungsmöglichkeiten großer Kraft- und Heizkraftwerke vor dem Hintergrund der Einspeisung vorrangig Erneuerbarer Energien untersucht. Denkbar sind ein mögliches Nachrüsten dieser Energieerzeuger mit einer Technik zur CO₂-Abtrennung oder auch der Einsatz von Elektroden-Heizkesseln zur Deckung des Wärmebedarfs in Stunden mit überschüssigem Windstrom.

Insgesamt wollen die Nachwuchswissenschaftler mit ihrer Arbeit folgende Fragen beantworten: Wie kann ein Kompromiss zwischen zentraler und dezentraler Energieerzeugung aussehen? Welche Arten von Energiespeichern sind für die jeweiligen Anforderungen geeignet? Sollten auch Kleinverbraucher wie Waschmaschinen oder Elektroautos in die Steuerung eingebunden werden, oder wäre der Aufwand dafür zu groß? Die Erkenntnisse aus der Modellregion Hamburg können anschließend auf andere

Städte in Deutschland oder sogar Europa übertragen werden, die ihren CO₂-Ausstoß reduzieren wollen. Nach Ablauf des Projekts wird die XRG Simulation GmbH, eine Ausgründung der TUHH, den Betrieb der Modell-Bibliothek übernehmen. Diese wird in etwa zwei Jahren für jedermann frei zugänglich sein. Welche Veränderungen zu welchen Folgen im Energie-versorgungssystem führen, darüber kann dieses an der TU Hamburg entwickelte Instrumentarium Auskunft geben. Die softwaregestützte Bibliothek bleibt dauerhaft aktuell und wird Schritt halten können mit dem zu erwartenden weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien in den kommenden Jahren.

Lisa Leander

www.tuhh.de/transient-ee

www.xrg-simulation.de/

Die Wissenschaftler



Lisa Andresen, M. Sc.

schreibt am Institut für Thermofluidynamik ihre Doktorarbeit über „Thermodynamische Bewertung von Energiespeichern in komplexen Energiesystemen“. Die Schleswig-Holsteinerin hat zwei Semester an der University of California, Berkeley studiert, vorausgegangen war dem ein strenges Auswahlverfahren. andresen@tuhh.de



Pascal Dubucq, M. Sc.

forscht seit Oktober 2013 am Institut für Elektrische Energiesysteme und Automation über die angebotsorientierte Regelung zur Integration Erneuerbarer Energien in elektrische Netze. Der studierte Maschinenbauingenieur mit belgischen Wurzeln sammelte während seines Studiums als Programmierer erste berufliche Erfahrungen. dubucq@tuhh.de



Ricardo Peniche, M. Sc.

beschäftigt sich seit Mai 2013 am Institut für Energietechnik mit der Untersuchung der flexiblen Fahrweise von fossilen Kraftwerken in Energienetzen mit hohem Anteil regenerativer Energie. Der Mexikaner studierte am Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey sowie an der TU Berlin Maschinenbau. peniche@tuhh.de

Green Technologies

Das Projekt „TransiEnt.EET“ ist ein Beispiel für Forschung auf dem Gebiet der Green Technologies, einem der drei 2011 an der TUHH konzipierten Kompetenzfelder. Speziell für den Bereich „Speichersysteme für Windenergie“ wird im Rahmen des TUHH-Exzellenzkollegs ein Juniorprofessor mit Nachwuchswissenschaftlern die Forschung auf diesem Gebiet verstärken. Die Finanzierung erfolgt aus Mitteln der TU Hamburg, der Wissenschaftsbehörde sowie des Partnerunternehmens Siemens Energy. Ziel ist es, gemeinsam nachhaltige Innovationen zu schaffen, die Wissenschaft und Wirtschaft in Hamburg gleichermaßen wettbewerbsfähig halten.

Hamburg as a model region for a new energy supply

The German federal government's energy policy concept aims to reduce greenhouse gas emissions dramatically – by at least 80 percent by 2050, compared with 1990. This ambitious target can only be achieved if renewables are optimally incorporated in the German power supply grid. Based on Hamburg as a model region, researchers at the Hamburg University of Technology (TUHH) plan to simulate a scenario of this kind

The TransientEnt.EE project is investigating the “transient behavior of coupled energy networks,” with a large part of the energy generated by renewables. Transient means these are processes in which the individual parameters change constantly over time. In terms of the energy supply system a number of examples of this exist. In winter more heating is needed than in summer, photovoltaic plant only supplies power during the daytime, and industry always needs energy exactly when it starts production. Heating and electricity generation are often directly related, as in gas-fired combined heating and power (CHP) stations. The term “coupled” energy networks or power grids is used because the electricity, heating and gas networks are linked with each other.

TransEnt.EE is fully financed by the Federal Ministry of Economics and Energy. Project partners are the TUHH Professors Günter Ackermann of the Institute of Electric Power Systems and Automation, Alfons Kather of the Institute of Energy Systems and Gerhard Schmitz of the Institute of Thermo-Fluid Dynamics, who is also the project coordinator. The project partners have chosen Hamburg, the city with the highest energy consumption in northern Germany, as their model region. At the same time Hamburg is highly dependent on energy imports. In 2013 over 75 percent of its electricity came from neighboring German states, and not even expansion of renewables will change this state of affairs to any great extent. Hamburg, for example, has few if any opportunities to

build new wind farms. It is another matter entirely in neighboring Schleswig-Holstein, where wind power facilities already generate an electricity supply surplus when the wind blows strongly. That is when consumers in Hamburg can play an important part by purchasing this surplus electricity.

The aim of the project at the TUHH is to set up a simulation in which the entire energy supply system from the producer via the grids to the consumer is managed in such a way that the reliability of energy supplies is ensured despite taking up fluctuating supplies of wind and solar power. Industrial consumers in particular, such as the steelmaker ArcelorMittal in the Port of Hamburg, rely on a stable supply of large amounts of energy from the grid. At the same time emissions of climate-damaging CO₂ are to be reduced and the rising cost of future energy supplies is to be limited.

Right now the PhD students Lisa Andresen, Pascal Dubucq and Ricardo Peniche are working on a software-based model library (see Modelica chart). This programming language is especially suitable for dynamic and interdisciplinary systems. The different producers, consumers, grids and storage facilities are represented in the model that has been drawn up. Large amounts of data supplied by these players that the Hamburg research scientists must collate by 2016 form the computational basis of these simulations. They enable the junior researchers to combine and connect the individual components and investigate the scenarios at different

times over an entire year.

Once the actual situation can be described using this model, four scenarios for a future energy supply will be researched in greater detail. In the first scenario Lisa Andresen is investigating inter alia how hydrogen can be generated from renewable electricity by means of a chemical process. Using this so-called power-to-gas process gas can then be stored in the natural gas grid. Wind farms would then not need to be switched off when they generate surplus electricity. This energy can then be used in a different form. The hydrogen generated might also be stored at a high energy density and then be used in a variety of ways. It could then, for example, be used as a chemical product in industrial processes or as a fuel for power stations, in combustion engines and for direct reconversion to electricity in fuel cells. An alternative to the power-to-gas process (see chart) is plant that converts the electricity directly into heat (power-to-heat). Less energy is lost in this technology than in converting power into gas. Both systems can be used flexibly, depending on whether there is a demand for heat when there happens to be a power surplus.

The second scenario, also to be investigated by Lisa Andresen, is based on the existence of a local power supply in which smaller CHP power stations provide both electricity and heating. They have the advantage of being able to respond fast and flexibly to changing supplies of renewables and fluctuating consumer demand. In the third scenario

Pascal Dubucq is looking into the possibility of controlling electricity consumers in line with the supply of renewables. An industrial company, for example, might switch its production to times when sufficient wind power can be generated. In the fourth scenario, of which Ricardo Peniche is in charge, operational and control options for large heating and power stations are to be investigated against the background of feeding in mainly renewables. These energy production facilities might, for example, be retrofitted with a carbon dioxide separation technology or electrode boilers used to meet the demand for heating at times when surplus wind power is available.

Overall the junior research scientists want with their work to answer the following questions: What could a compromise between central and local energy generation look like? What kinds of energy storage are suitable for the various requirements? Should small consumers like washing machi-

nes or battery-powered cars be included in the energy management or would that be simply too expensive?

The findings for the model region Hamburg can then be transferred to other cities in Germany or even Europe that want to reduce their carbon dioxide emissions. Once the project has expired XRG Simulation GmbH, a TUHH spinoff company, will take over the running of the model library, which will be freely accessible for everybody in about two years. This instrument developed at the Hamburg University of Technology can provide information about which changes lead to which consequences in the energy supply system. The software-assisted library will remain permanently up to date and be able to keep pace with the anticipated further expansion of renewables in the years to come.

Lisa Leander

www.tuhh.de/transient-ee

Green Technologies

The TransiEnt.EET project is an example of research in the area of Green Technologies, one of the three competence areas conceived at the TUHH in 2011. As a part of the TUHH's College of Excellence a junior professor and junior research scientists will boost research in this area on storage systems for wind power. Funding is provided by the TUHH, the Hamburg Department of Science and the partner company Siemens Energy. The aim is jointly to create sustainable innovations that keep science and business competitive in equal measure in Hamburg.