



Leitthemen der aktuellen Forschung

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft
und Energiesystemtechnik



Resilienz

Stabilität und Flexibilität des
Energiesystems

4



8

Sektorenkopplung

Wasserstoff, Wärmenetze,
E-Mobilität



Digitalisierung

Smarte Prozesse für die
Energiewirtschaft

12



Forschung für Energiewende und Klimaschutz

Dem Klimawandel etwas entgegenzusetzen, ist eine gesellschaftliche Verpflichtung und zugleich eine der größten wirtschaftlichen Chancen. Unter dem Motto »Energiewende gestalten« forschen wir im Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE seit 35 Jahren für eine Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien – national wie international. Unser Institut wurde 1988 als Institut für Solare Energieversorgungstechnik ISET e.V. in Kassel gegründet, 2009 als Institutsteil Energiesystemtechnik in das Fraunhofer IWES aufgenommen und 2018 in das eigenständige »Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE« überführt.

Wir entwickeln Lösungen für technische und wirtschaftliche Herausforderungen, um die Kosten weiter zu senken, die Versorgung zu sichern, die Digitalisierung in der Energiewirtschaft voranzubringen und neue Geschäftsmodelle in der Energiewende zu ermöglichen.

Unsere Geschäftsfelder sind auf die zielführende Integration der Forschungsergebnisse in die praktische Anwendung spezialisiert. Die thematische Bandbreite reicht von techno-ökonomischen Betrachtungen und Szenarien zur Planung und zum Betrieb von Energieversorgungsstrukturen, der Begleitung in Feldtests bis zur Optimierung des Zusammenspiels der Komponenten. Eine besondere Rolle spielt die Weiterentwicklung des Gesamtsystems: Die fortschreitende Integration erneuerbarer, dezentraler Erzeuger und die Umgestaltung der Netzinfrastrukturen. Dabei werden sich ändernde Anforderungen resultierend aus der Systemkopplung von Strom, Wärme, Gas und Verkehr einbezogen. Ziel ist es, die Abstimmung zwischen fluktuierender Erzeugung und flexiblem Bedarf sicher zu stellen.

Die Leistungen des Instituts erstrecken sich von der gemeinschaftlichen Forschung im Rahmen von Konsortialprojekten bis zur Auftragsforschung für Partner aus Wirtschaft und Gesellschaft. Außerdem bietet das Fraunhofer IEE Test- und Beratungsleistungen zu spezifischen Fragestellungen, die Entwicklung von Funktionsmustern und Prototypen sowie die Evaluation von Feldtests.

Der neue vom Land Hessen sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierte Campus des Fraunhofer IEE bietet unseren mittlerweile 450 Mitarbeitenden eine moderne und attraktive Arbeitsumgebung. Ein großes Technikum mit Fachlaboren für Leistungselektronik, Stromrichter, Mittelspannungstechnik, Batteriesysteme, Wasserstoff, Wärmenetze und digitale Netzleittechnik eröffnet nun erweiterte Möglichkeiten, die Wirtschaft durch angewandte Forschung in diesem wichtigen Innovationsfeld zu unterstützen.

Resilienz: Stabilität und Flexibilität des Energiesystems

Mit der Transformation des Energiesystems wächst dessen Komplexität. Daraus entstehen neue Herausforderungen für die Versorgungssicherheit. Das Fraunhofer IEE trägt dazu bei, das System durch seine Forschungs- und Entwicklungsarbeit resilienter zu machen.



Das Strom-Versorgungssystem ist das technologische Rückgrat unserer Gesellschaft



Dr. Philipp Strauss, stellvertretender Institutsleiter, Leiter des Forschungsbereichs Netzstabilität und Stromrichtertechnik

In kaum einem anderen Land der Welt fließt der Strom so verlässlich wie in Deutschland: Gerade einmal 10 bis 15 Minuten pro Jahr fällt hierzulande im Durchschnitt die Versorgung aus. Mit der Energiewende entstehen allerdings einige neue Herausforderungen bei der Aufgabe, die Versorgungssicherheit auf dem gewohnt hohen Niveau zu halten. Dabei geht es um weit mehr als Elektrizität: „Die Stromversorgung ist eine kritische Infrastruktur, von der wiederum andere kritische Infrastrukturen abhängen, etwa Kommunikationsnetze, der Verkehr oder die Gesundheitsversorgung. Deshalb ist das Strom-Versorgungssystem das technologische Rückgrat unserer Gesellschaft“, sagt Dr. Philipp Strauss, stellvertretender Leiter des Fraunhofer IEE und Forschungsleiter Netzstabilität und Stromrichtertechnik.

Gute Gründe also für das Fraunhofer IEE, einen Schwerpunkt seiner Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf die Resilienz der Stromversorgung zu legen – und das schon seit vielen Jahren. „Die Aufgabe besteht im Kern darin, Netzplanung und -betrieb so robust zu gestalten, dass die Versorgung zu jeder Zeit gesichert ist“, umreißt Prof. Dr. Martin Braun, Forschungsleiter Netzplanung und Netzbetrieb am Fraunhofer IEE und zugleich Professor an der Universität Kassel, das Forschungsfeld des Instituts. „Dazu gehört auch, zu verhindern, dass es zu Blackouts kommt, wenn Störungen auftreten, etwa durch Naturkatastrophen, Sabotageakte oder menschliches respektive technisches Versagen. Und falls sich ein Blackout doch einmal nicht verhindern lassen sollte, gilt es, die Versorgung so schnell wie möglich wieder herzustellen“, so Braun.

Stromrichter als ein Schlüssel zur Versorgungssicherheit

Besonders dabei im Fokus der Fraunhofer-Forschenden: die Stromrichter. „Sie werden gemeinhin gerne übersehen, haben aber enorme Bedeutung für die Versorgungssicherheit“, sagt Strauss. Denn mit der Energiewende wird das System weit kleinteiliger – und damit komplexer. So ersetzen dezentrale Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen die fossilen Großkraftwerke. Dazu kommen neue Verbraucher wie Wärmepumpen, Elektroauto-Ladestationen und Elektrolyseure sowie



Batteriespeicher. All diese Komponenten werden über Stromrichter in die Netze eingebunden. Und auch dort findet sich die Technologie, zum Beispiel an den Koppelstellen der einzelnen Netzebenen.

Die Stromrichter sind so wichtig für die Resilienz des Energiesystems, weil sie zum einen Daten erfassen, aus denen sich dessen Zustand ablesen lässt – vor allem Strom und Spannung sowie, als abgeleitete Größe, die Frequenz. Und zum anderen dienen sie als Steuereinheiten, die den Stromfluss so organisieren können, dass die Stabilität der Versorgung gewährleistet bleibt. Dazu bringen sie bei Abweichungen von den Sollgrößen Trägheit ins System. Auf diese Weise verschaffen sie den Netzbetreibern Zeit, die nötigen Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Das Fraunhofer IEE hat nun – als eines von vielen Projekten in diesem Bereich – zusammen mit Partnern untersucht, über welche technischen Eigenschaften Stromrichter verfügen müssen, um ihrer Bedeutung für die Versorgungssicherheit gerecht werden zu können. Dabei hat das Institut die Gesamtkoordination übernommen; inhaltlich lag der Fokus der Fraunhofer-Forscher auf der Regelung der Stromrichter, die die benötigte elektrische Trägheit quasi synthetisch erzeugen. Die Ergebnisse aus diesem Projekt fließen künftig in die technischen Anwendungsregeln des VDE Forums Netztechnik und Netzbetrieb

und in Normungsprozesse der Deutschen Kommission Elektrotechnik ein.

Leitwarten der Netzbetreiber weiterentwickeln

Darüber hinaus unterstützt das Fraunhofer IEE Netzbetreiber bei der kontinuierlichen Online-Bewertung der Netzstabilität mittels der Stromrichter. „Wir haben unter anderem eine neue Methode zur Unterstützung der Langzeit-Spannungsstabilität entwickelt, die Überlastungssituationen des Übertragungsnetzes minimalinvasiv begegnen kann. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Strom-einspeisung zunehmend aus den unteren Netzebenen erfolgt“, erklärt Strauß.

Auch helfen Instrumente des Instituts den Netzbetreibern, auf solche Situationen zu reagieren: Sie schlagen den Mitarbeiter:innen

Resiliente Energiesysteme der Zukunft müssen stabil und flexibel sein.



Prof. Dr. Martin Braun, Leiter des Forschungsbereichs Netzplanung und Netzbetrieb



Mit unseren Werkzeugen lassen sich Netze kosteneffizient und resilient gestalten



*Magnet-Ringkerngenerator,
Testaufbau am Fraunhofer
IEE*

der Leitwarten passende Gegenmaßnahmen vor und simulieren, was passiert, wenn sie diese ergreifen. Dabei berücksichtigen die Werkzeuge aus dem Fraunhofer-Institut als Nebenbedingung, Eingriffe wie etwa das Drosseln von Erzeugungsanlagen möglichst gering ausfallen zu lassen, da dies Kosten verursacht.

Mikronetze schaffen, Schwarzstart ermöglichen

Stromrichter haben aber auch deshalb so große Bedeutung für die Resilienz des Systems, weil sie bei größeren Störfällen dafür sorgen können, dass sich Mikronetze bilden, in denen die Versorgung aufrecht erhalten bleibt. Und sie helfen beim Schwarzstart, also dem Hochfahren der Stromversorgung nach einem Blackout: Mit einer intelligenten Steuerung sorgen sie dafür, dass die einzelnen Erzeugungsanlagen in der richtigen Reihenfolge zum richtigen Zeitpunkt wieder ans Netz gehen können. Für beide Anwendungsfälle – Mikronetze und Schwarzstart – haben die Fraunhofer-Forscher:innen die jeweils nötigen Regelungsverfahren entwickelt.

Bei all dem profitiert das Fraunhofer IEE von seiner jahrzehntelangen Beschäftigung mit Stromrichtern in Inselnetzen. „Wir wissen aus zahlreichen Projekten, wie man fragile Systeme mit Stromrichtern stabilisiert“, so Strauß. „Deshalb verstehen wir die Technologie und ihre Potenziale bestens, vom

physikalischen Aufbau über deren digitale Regelung bis hin zu ihrer aktiven Integration ins Energiesystem.“

Mehr Resilienz durch optimierte Netzplanung

Zum Schutz vor Blackouts gehört aber natürlich auch, die Stromnetze so zu gestalten, dass ihr Ausfallrisiko möglichst gering ist. Das Fraunhofer IEE hat deshalb zahlreiche Netzstudien durchgeführt, die zeigen, wie sich die Resilienz bestehender wie neuer Netze stärken lässt. „Wir schauen uns zum Beispiel an, wie die Netzbetreiber Folgefehler und damit Kaskadenstörungen vermeiden können“, sagt Martin Braun. Auch nehmen die Fraunhofer-Fachleute unter die Lupe, welche Auswirkungen mögliche IT-Störungen auf die Versorgungssicherheit haben könnten.

Darüber hinaus hat das Institut Planungsmodule entwickelt, mit denen die Netzbetreiber ihre Netze auf neue Anforderungen, etwa durch den Anschluss von Photovoltaik-Anlagen, Wärmepumpen oder Wallboxen, auslegen können. „Wir geben ihnen die nötigen Instrumente in die Hand, um ihre Netze zu minimalen Kosten auch resilienter zu machen“, erklärt Braun. So ermitteln die Optimierungs-Algorithmen der Module automatisch, wie sich die Netze bestmöglich verstärken lassen, etwa durch größere Leitungsquerschnitte, das Legen paralleler Leitungen, durch eine andere Verschaltung oder durch leistungsstärkere

Transformatoren. Das geschieht auf Basis einer vorangegangenen Modellierung der Netztopologie. Dabei stellen die Fraunhofer-Expert:innen eine robuste Netzauslegung potenziellen Ausfällen von Betriebsmitteln gegenüber und berücksichtigen auch die Handlungsoptionen zur möglichst schnellen Wiederversorgung nach einem Blackout.

Zudem berät das Fraunhofer IEE Übertragungsnetzbetreiber, wie sie ihre Netze bei einem Versorgungsausfall künftig sicher und schnell wieder aufbauen können – schließlich müssen die etablierten Aufbaupfade im Zuge der Energiewende neu ausgestaltet werden. So geben Erzeugungsanlagen im Verteilnetz den Netzbetreibern etwa in Städten die Möglichkeit, diese Netze auch bei einem Blackout zumindest teilweise als Inselnetz weiterzubetreiben.

„Wir kümmern uns also nicht nur darum, die Robustheit der Netze gegenüber Versorgungsausfällen zu steigern, sondern auch darum, bei einem Blackout die Netze schnell und sicher wieder zu versorgen“, fasst Braun zusammen.

Algorithmen für den sicheren Netzbetrieb

Für den Netzbetrieb selbst hat das Fraunhofer IEE unter anderem Algorithmen entwickelt, die im Falle eines Engpasses selbsttätig ermitteln, wo Leistung in welchem Maße erhöht oder reduziert werden muss, um die Versorgung zu sichern. Dabei berücksichtigen die Forscher:innen auch mögliche Cyberangriffe, die Messwerte manipulieren und so zu falschen Handlungen verleiten. „Das geht so weit, dass wir selbst fiktive Angriffe durchführen, um besser erkennen zu können, wie sich solche Sabotageakte auswirken“, erläutert Braun.

Die Netzbetreiber können diese und andere Instrumente des Instituts direkt in ihre Leitwarten-Systeme einbinden. Das gilt auch für eine Software des Instituts, die Betreiber von Verteilnetzen dabei unterstützt, einem Übertragungsnetzbetreiber Flexibilitäten aus ihren Netzen zur Verfügung zu stellen, so dass dieser kritische Situationen meistern kann. Zuvor müssen die Verteilnetzbetreiber allerdings erst einmal prüfen, welchen Spielraum sie hier überhaupt haben. Diese durchaus komplexen Berechnungen übernimmt ein KI-basierter Algorithmus des Fraunhofer IEE.

Ein sicherer Netzbetrieb setzt auch voraus, dass stets das nötige Maß an Blindleistung – das „Schmiermittel“ der Netze – zur Verfügung steht. In der alten fossilen Energiewelt stellen die fossilen Kraftwerke die Blindleistung bereit. Diese Aufgabe müssen künftig vor allem Erneuerbare-Energien-Anlagen sowie Speicher übernehmen. Die Fraunhofer-Forschenden untersuchen derzeit zusammen mit Partner:innen, wie sie diese Aufgabe bestmöglich erfüllen können.

Verständnis für die komplexen Wechselwirkungen

Was qualifiziert das Fraunhofer IEE, all diese für die Systemsicherheit so zentralen Fragestellungen zu bearbeiten? „Angesichts der zunehmenden Komplexität des Energiesystems verlangt die Forschungs- und Entwicklungsarbeit zur Resilienz ein tiefes Verständnis der vielfältigen Wechselwirkungen innerhalb des Systems“, erklärt Braun. „Dieses Verständnis haben wir, dank unserer langjährigen Erfahrung und der Vielzahl an Themenfeldern, auf denen wir arbeiten.“

So befasst sich das Fraunhofer IEE mit Komponenten wie Stromrichtern genauso wie mit der Netzinfrastruktur auf allen Ebenen, ebenso mit Regelungs- und Optimierungsverfahren, und verfügt zudem über ein hohes Maß an Digitalkompetenz, betont Braun. „Damit tragen wir dazu bei, dass Deutschland bei der Versorgungssicherheit auch künftig zur Weltspitze gehört!“

Unsere Forschungsthemen

- Stromrichter und elektrische Maschinen
- Stromrichterdominierte Netze, Netzanschluss
- Rapid-Prototyping-Systeme
- Hardware-in-the-Loop und Software-in-the-Loop
- Netzstabilität, -regelung und -schutz
- Automatisierte Netzplanung, Netzanalysen
- Systemführung, Zustandsbewertung und -prognose
- Systemdienstleistungen, Engpassmanagement, Netzwiederaufbau
- Digitale Zwillinge, Co-Simulation, Optimierungsmethoden
- Zuverlässigkeit und Resilienz

Sektorenkopplung: Wasserstoff, Wärmenetze, E-Mobilität

Weniger Emissionen, mehr Flexibilität: Die Sektorenkopplung ist Schlüsselement der Energiewende. Die Weichen für die Verknüpfung von Strom, Wärme, Industrie und Verkehr werden jetzt gestellt. Das Fraunhofer IEE hilft Politik und Unternehmen, hier die richtigen Entscheidungen zu treffen. Dabei verbinden die Forschenden Technologie, Ökonomie und Regulatorik.



Was wir viele, viele Jahre lang berechnet haben, ist zum Regierungsprogramm geworden



Norman Gerhardt, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energiewirtschaft und Systemanalyse

Wie viel Windenergie- und Solarleistung erfordert die Energiewende, was können Speicher beitragen, welche Rolle spielen Wasserstoff oder die Elektromobilität im Energiesystem der Zukunft? Das sind typische Fragen, die die Forschungsarbeit des Fraunhofer IEE lange Zeit geprägt haben. Mit ihren Studien und Modellierungen haben die Wissenschaftler:innen gezeigt: Der klimagerechte Umbau des Energiesystems ist technisch machbar, stärkt dessen Resilienz und zahlt sich wirtschaftlich aus.

Heute ist Konsens in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, dass die Energiewende alternativlos ist. „Was wir viele, viele Jahre lang berechnet haben, ist zum Regierungsprogramm geworden“, sagt Norman Gerhardt, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energiewirtschaft und Systemanalyse am Fraunhofer

IEE. Damit verändern sich die Aufgaben des Instituts. „Unser Fokus liegt jetzt stärker auf der Umsetzung. Wir arbeiten zum Beispiel mit Systemmodellierungen Optimierungspotenziale heraus und geben Unternehmen Werkzeuge für Planung und Betriebsführung in die Hand“, erklärt Gerhardt.

Sektorenkopplung als Schlüssel zur Energiewende

Mit der allgemeinen Akzeptanz der Energiewende hat sich auch dessen Verständnis geändert: Lag der Fokus lange Zeit auf dem Stromsektor, so ist in den letzten Jahren verstärkt die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, der Industrie und des Verkehrs in den Blick gerückt.

Wichtigster Klimaschutz-Hebel ist hier, fossile Energieträger durch Strom aus erneuerbaren Quellen zu ersetzen. Zwei Optionen stehen dabei zur Verfügung: die direkte Elektrifizierung von Prozessen und Technologien oder aber der Einsatz von grünem, per Elektrolyse produziertem Wasserstoff und seiner Derivate wie Ammoniak, Methanol oder E-Fuels („Power-to-X“, kurz PtX).

Der Einsatz von erneuerbarem Strom reduziert jedoch nicht nur die CO₂-Emissionen der einzelnen Sektoren, sondern ermöglicht auch deren Kopplung. Das bringt Flexibilität ins Energiesystem – unverzichtbar für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, da



Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen nicht nach Bedarf, sondern nach Wetterlage Strom erzeugen. So lassen sich mit der Verknüpfung der einzelnen Sektoren wechselseitig Strom-Defizite und -Überschüsse ausgleichen. „Die Sektorenkopplung ist Schlüsselement für die Transformation des Energiesystems von fossil zu erneuerbar“, betont Gerhardt.

Lock-In-Effekte und Fehlinvestitionen vermeiden

Noch steckt die Sektorenkopplung ganz in den Anfängen – es fehlt bislang vielfach an der nötigen Infrastruktur, an Geschäftsmodellen und auch an einem Rechtsrahmen, der diesen Prozess unterstützt. Eine spannende Phase, meint Jochen Bard, Leiter des Forschungsbereichs Energieverfahrenstechnik und -speicher beim Fraunhofer IEE: „Jetzt werden die Weichen für die Kopplung der Sektoren gestellt, etwa mit Investitionsentscheidungen oder der Gestaltung der regulatorischen Basis.“ Dabei gelte es, sorgfältig zu prüfen, was zielführend ist, was als Übergangslösung dienen kann und was langfristig gefordert ist. „Hier können wir Politik und Unternehmen Orientierung geben. Damit helfen wir, Lock-In-Effekte oder Fehlinvestitionen zu vermeiden“, sagt Bard.

Wasserstoff-Systeme effizient, kostenoptimal und nachhaltig gestalten

Was tut das Fraunhofer IEE konkret, um die Sektorenkopplung auf den Weg zu bringen? Ein Schwerpunkt liegt auf dem Thema

Wasserstoff. „Wir haben eine ganze Reihe von Studien erstellt, die unter anderem zeigen, wo wie viel Wasserstoff benötigt wird, wo er erzeugt werden kann und wie er sich transportieren lässt“, erklärt Bard.

Zum Beispiel hat das Fraunhofer IEE mit dem globalen Power-to-X-Atlas eine detaillierte Bestandsaufnahme der weltweiten technischen und ökonomischen Erzeugungspotenziale für Wasserstoff und andere PtX-Energieträger wie Ammoniak vorgelegt. Die Bewertung basiert auf umfangreichen Analysen, beispielsweise der Flächenverfügbarkeit und der Wetterbedingungen. Auch Faktoren wie die lokale Wasserverfügbarkeit, den Naturschutz, die Investitionssicherheit am jeweiligen Standort und die Transportkosten haben die Forschenden berücksichtigt.

Power-to-X Potenzialatlas des Fraunhofer IEE: Hochaufgelöste Simulationen für ein erstes außereuropäisches Power-to-X-Mengenszenario [maps.iee.fraunhofer.de/ptx-atlas]



Jochen Bard, Leiter des Forschungsbereichs Energieverfahrenstechnik



Wir helfen Politik und Unternehmen, Lock-In-Effekte oder Fehlinvestitionen zu vermeiden



Wärme fordert einen Ansatz, der die Transformation des gesamten Energiesystems berücksichtigt



Dr. Anna Marie Cadenbach, Leiterin des Forschungsschwerpunkts Thermische Energiesystemtechnik

Mit dem PtX-Atlas hat das Fraunhofer IEE eine Grundlage für die nötigen Importe von Wasserstoff und den darauf basierenden Energieträgern geschaffen. Aber genauso trägt das Fraunhofer IEE dazu bei, identifizierte Potenziale zu erschließen: In mehreren afrikanischen und südamerikanischen Ländern beteiligen sich Experten:innen des Instituts daran, Erneuerbare-Energien- und Wasserstoff-Projekte aufzubauen. „Dabei geht es vor allem um Fragen der Auslegung der Systeme, etwa mit Blick auf die Kosteneffizienz. Auch haben wir die Nachhaltigkeit der Vorhaben im Visier, vor allem was den Wasserbedarf und das für viele PtX-Energieträger benötigte Kohlendioxid betrifft“, erläutert Bard. „Darüber hinaus befassen wir uns damit, wie sich die erzeugten Energieträger bestmöglich nach Europa transportieren lassen – und auch damit, wie sich sicherstellen lässt, dass sie die regulatorischen Anforderungen der EU erfüllen.“

Bedeutung der Elektrolyseure für den Netzausbau

Neben den Importen sind auch PtX-Energieträger „made in Germany“ unverzichtbar für Klimaschutz und Energiewende. Daher beschäftigen sich die Forscher:innen ebenso mit der Integration der Elektrolyseure ins heimische Energiesystem. So haben sie beispielsweise ein Modell entwickelt, mit dem die Übertragungsnetzbetreiber bei ihrer Netzausbauplanung berücksichtigen können, welche Auswirkungen der Bau von Elektrolyseuren an welchen Standorten auf die Netze haben wird.

Ein weiteres Arbeitsfeld des Fraunhofer IEE sind die Wasserstoff-Technologien. „Wir entwickeln zum Beispiel derzeit Leistungselektronik

für Elektrolyseure im dreistelligen Megawattbereich“, sagt Bard. Dabei können die Forscher:innen ihre Erfahrungen aus der Batterietechnologie nutzen. „Was wir dort mit Simulationen tun, übertragen wir jetzt auf Elektrolyseure und auch auf Brennstoffzellen.“

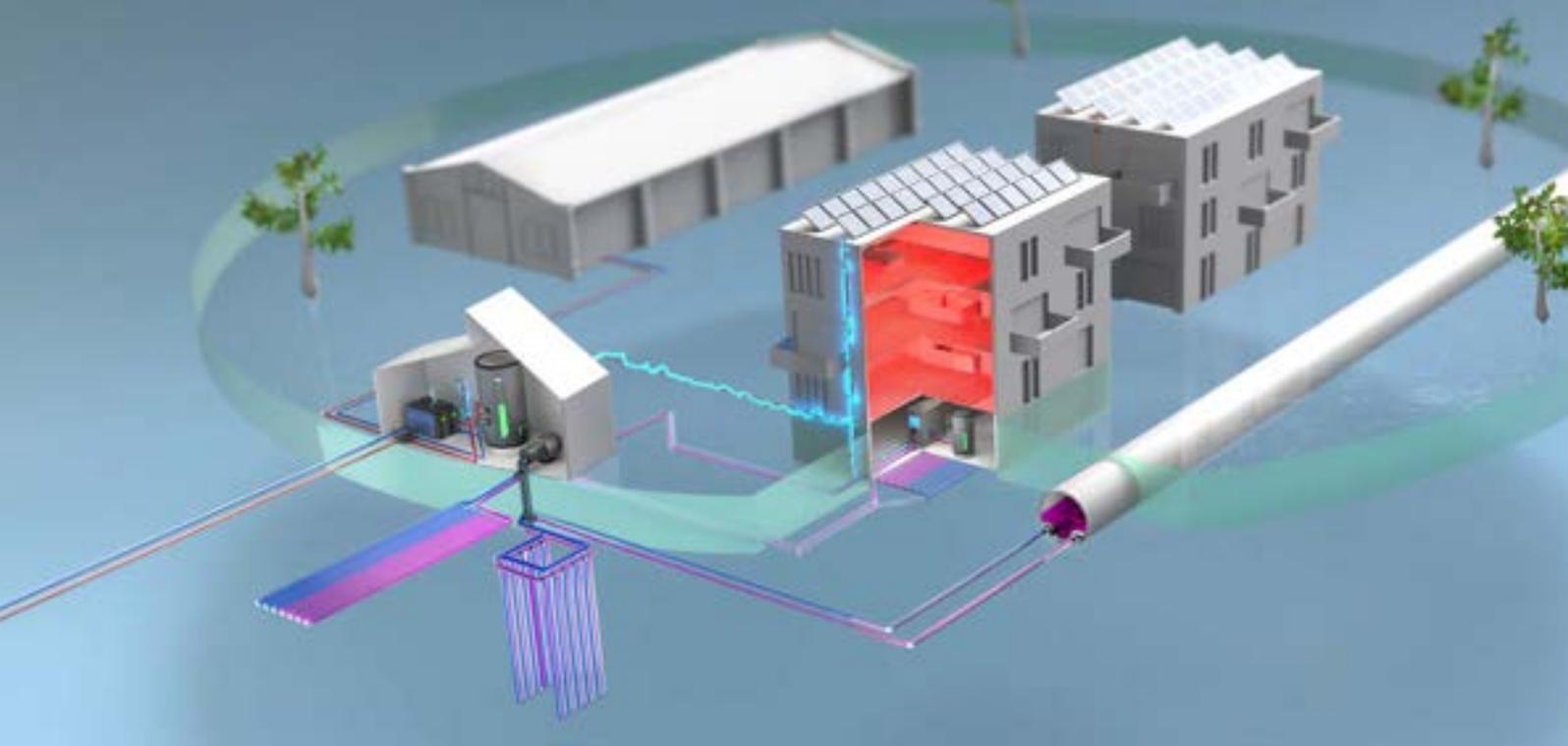
Technologie, Ökonomie und Regulatorik zusammenführen

Wie die meisten anderen Forschungsvorhaben des Fraunhofer IEE adressieren die Projekte im Bereich Wasserstoff nicht nur technologische, sondern gleichfalls wirtschaftliche und regulatorische Aspekte. „Das beschleunigt die Übertragung der Innovationen und Konzepte in die Praxis – und damit die Energiewende als Ganzes“, erklärt Bard.

Einen solch übergreifenden Ansatz verfolgt das Institut auch im Bereich der Wärmeversorgung, einem weiteren Handlungsfeld der Sektorenkopplung – etwa im Bereich der kommunalen Wärmeplanung, wo die Fraunhofer-Forscher:innen beim Um- und Aufbau klimagerechter Systeme unterstützen. „Wir verknüpfen technologische Fragen unter anderem mit der Stadt- und Quartiersentwicklung, um zu zeigen, wie die Transformation gelingen kann“, sagt Dr. Anna Marie Cadenbach, Leiterin des Forschungsschwerpunkts Thermische Energiesystemtechnik beim Fraunhofer IEE.

Ein Beispiel dafür ist das Quartierskonzept, das die Wissenschaftler:innen für das ehemalige Kasernengelände Lagarde in Bamberg erstellt haben, ein sehr heterogenes Viertel mit Alt- und Neubauten, die auf vielerlei Weise genutzt werden. Dafür haben die Fraunhofer-Forscher:innen den Einsatz von zwei Wärmenetzen geplant; eines davon als kaltes Netz, das Wärmepumpen als Quelle dient. Auch an der Umsetzung ist das Fraunhofer IEE beteiligt. „Wir überprüfen zum Beispiel mit Messungen, ob sich die erwarteten Ergebnisse einstellen, und steuern gegebenenfalls gegen“, erklärt Cadenbach. Wärmenetze haben große Bedeutung für die Energiewende in diesem Sektor, da sie es erlauben, die ganze Bandbreite erneuerbarer Wärmequellen nutzbar zu machen.

Bei diesem wie auch anderen Quartierskonzepten legen die Fraunhofer-Forscher:innen



besonderen Fokus darauf, die Potenziale der Digitalisierung für die Transformation der Wärmeversorgung zu nutzen, auf Ebene der Netze wie der einzelnen Gebäude – zum Beispiel um Erzeugungs- und Bedarfsprognosen bei der Steuerung der Systeme berücksichtigen zu können. „Die Digitalisierung bringt Flexibilität in die Wärmeversorgung“, bringt Cadenbach deren Nutzen auf den Punkt.

Transformation der Wärmeversorgung verlangt systemische Perspektive

Der Umbau bestehender Wärmenetze birgt die Herausforderung, nicht frei experimentieren zu können, da die Verbraucher jederzeit verlässlich versorgt werden müssen. Deshalb errichtet das Fraunhofer IEE derzeit ein „District LAB“: ein Labor mit angeschlossenem thermischem Netz im Quartiersmaßstab, in der allerlei versorgungsrelevante Bauteile installiert sind. Sie erlauben es, nahezu beliebig Wärmequellen und -senken nachzubilden. „Wir können dort zum Beispiel Versorgungsszenarien mit verschiedenen Einspeisern ins Wärmenetz erproben, Parameter für die Betriebsoptimierung testen und komplexe Regelungsstrategien überprüfen. Das geht weit über digitale Simulationen hinaus“, erklärt die Expertin.

So haben die Fraunhofer-Forscher:innen im District LAB zum Beispiel die Möglichkeit zu testen, wie sich eine Temperaturabsenkung im Netz auf die Wärmeversorgung auswirkt, etwa um Abwärmequellen zu erschließen. Auch können sie dort untersuchen, wie sich das Verhalten von Prosumern, die Wärme

sowohl einspeisen als auch entnehmen, auf die Versorgungssicherheit auswirkt. Die Einrichtung steht auch Netzbetreibern, Energieversorgern, Systemplanern und Komponenten-Herstellern für Tests und Experimente zur Verfügung.

Mit den vielfältigen Möglichkeiten zur Einbindung erneuerbarer Energien – von der Abwärme eines Elektrolyseurs bis hin zu Power-to-Heat-Anlagen – bietet die Wärmeversorgung zahlreiche Ansatzpunkte für die Sektorenkopplung. „Das Thema Wärme ist heute sehr komplex“, sagt Cadenbach. „Es verlangt einen Ansatz, der die Transformation des gesamten Energiesystems berücksichtigt. Diese systemische Perspektive macht unsere Arbeit enorm spannend.“

Schematische Darstellung des im Projekt Lagarde entwickelten Energieversorgungskonzepts auf dem Konversionsgelände in Bamberg.

Unsere Forschungsthemen

- Energiesystem und -märkte, Geschäftsmodelle
- Wärme- und Verkehrswende
- Methodenentwicklung, Techno-ökonomische Studien
- Power-to-X und Wasserstoffanwendungen
- Systemtechnik für Elektrolyseure und Brennstoffzellen
- Speichersysteme, Batterie-Modellierung
- Daten- und modellgestützte Betriebsoptimierung
- Energie-System-Stadt, Bewertung von Versorgungslösungen
- Innovative Energiekonzepte für Gebäude und Quartiere
- Digitalisierung der Fernwärme
- Thermo-hydraulische Systemsimulation

Digitalisierung: Smarte Prozesse für die Energiewirtschaft

Die zunehmende Komplexität des Energiesystems verlangt dessen Digitalisierung. Daran arbeitet das Fraunhofer IEE – unter anderem mit KI-gestützten Systemen für Prognosen und automatisierten Entscheidungen. Netzbetreiber können damit zum Beispiel drohende Engpässe erkennen, Windpark-Betreiber die Vermarktung ihres Stroms optimieren.



Die Digitalisierung ermöglicht neue Geschäftsmodelle und erweitert die Wertschöpfung



Reinhard Mackensen, kommissarischer Institutsleiter, Leiter des Forschungsbereichs Energiewirtschaftliche Prozessintegration

Die alte fossile Energiewelt war recht übersichtlich: Den Strom lieferten vor allem Großkraftwerke, genau abgestimmt auf den Bedarf. An ihre Stelle treten mit der Energiewende nun unzählige kleine, dezentrale Erzeugungsanlagen, deren Ertrag sich in der Regel allein nach dem Wetter richtet. Das macht die Arbeit der Netzbetreiber, Versorger und anderer Akteure deutlich komplexer. Auf Seiten der Nachfrage entstehen allerlei Herausforderungen. So lassen etwa Wärmepumpen, Elektroautos und Elektrolyseure den Strombedarf steigen. Zugleich bieten diese Verbraucher aber die Chance, das Energiesystem flexibler zu gestalten. Das schafft neue Möglichkeiten für die Steuerung des Systems.

„Die stark zunehmende Komplexität können wir nur mit einer umfassenden, alle Prozesse

durchdringenden Digitalisierung des Energiesystems in den Griff bekommen“, erklärt Dr. Reinhard Mackensen, Institutsleiter des Fraunhofer IEE sowie Leiter des Forschungsbereichs Energiewirtschaftliche Prozessintegration des Instituts. Das bedeutet zum einen: detaillierte Daten zu erheben, beispielsweise aus Verteilnetzen oder der Wärmeversorgung, diese aufzubereiten, mit anderen Daten, etwa aus der Meteorologie, zu verbinden – und zum anderen, daraus mit Prognose- und anderen Verfahren Informationen zu gewinnen, mit dem sich der enorme Steuer- und Regelaufwand in der neuen dezentralen Energiewelt beherrschen lässt.

So anspruchsvoll diese Aufgabe auch ist: Sie bietet der Energiewirtschaft große Chancen, nicht nur mit Blick auf die Optimierung ihrer Prozesse. „Die Digitalisierung ermöglicht völlig neue Geschäftsmodelle, sie erweitert die Wertschöpfung und schafft Flexibilitäten. Und zugleich gibt sie Schlüsselakteuren wie den Netzbetreibern neue Instrumente in die Hand, die Resilienz des Systems zu stärken“, sagt Mackensen.

Digitalisierung als Querschnittsaufgabe

Rund 100 Digitalisierungsexpert:innen, verteilt über alle Abteilungen, sind beim Fraunhofer IEE damit beschäftigt, Unternehmen und auch die Politik bei all diesen Herausforderungen zu unterstützen. Zusammen mit Industriepartnern entwickeln die Fraunhofer-Fachleute



vielfältige, marktreife Produkte; die dafür nötige Vorentwicklung erfolgt in öffentlich geförderten Projekten.

„So wie die Digitalisierung alle Handlungsfelder von der Erzeugung über die Sektorenkopplung bis zum Verbrauch durchdringt, so ist sie auch beim Fraunhofer IEE Querschnittsthema“, betont Mackensen. Dabei beschränken sich die Fraunhofer-Expert:innen aber nicht auf die informationstechnologische Seite. „Die Aufgaben der Digitalisierung sind sehr vielschichtig, sie haben immer auch eine wirtschaftliche und eine regulatorische Dimension. Dank der Breite der Kompetenzen im Institut können wir auch diese Aspekte integrieren“, sagt Manuel Wickert, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energieinformatik beim Fraunhofer IEE.

Stets mit im Fokus dabei: der Schutz entwickelter Systeme und Produkte vor möglichen Hacker- und anderen Angriffen. „Sicherheitsfragen nehmen wir enorm wichtig. Das spiegelt sich auch in der Zertifizierung des Fraunhofer IEE nach ISO 27001“, unterstreicht Institutsleiter Mackensen.

KI-basierte Prognosen für Netzbetrieb und Vermarktung

Ein Schwerpunkt des Fraunhofer IEE bei der Digitalisierung liegt auf der Entwicklung und dem Einsatz von KI-basierten Prognoseinstrumenten. „Um das Energiesystem

vorausschauend steuern zu können, müssen Netzbetreiber und andere Akteure wissen, wie sich die Komponenten des Systems, die Erzeuger wie die Verbraucher, verhalten werden, in einer Viertelstunde, am nächsten Tag oder auch später. Dafür liefern wir die Lösungen“, erklärt Dr. Jan Dobschinski, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energiemeteorologie und Geoinformationssysteme beim Fraunhofer IEE.

Beispiel Windenergie: Die Fraunhofer-Forscher:innen haben Prognose-Systeme entwickelt, die mithilfe von KI-Verfahren wie dem maschinellen Lernen anhand von Wettervorhersagen ermitteln, wie viel Strom einzelne Windparks erzeugen und an bestimmten Netzknoten einspeisen werden. Die eingesetzten Modelle wurden zuvor mit historischen

Die Komplexität des Energiesystems verlangt dessen umfassende Digitalisierung



Manuel Wickert, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energieinformatik



Wir entwickeln Agenten, die KI-gestützt automatisierte Entscheidungen treffen



Windparkbetreiber können mit KI die Vermarktung ihres Stroms optimieren.

Wetter- und Ertragsdaten trainiert. Dobschinski nennt beispielhaft zwei Anwendungsmöglichkeiten: „Netzbetreiber können so drohende Netzengpässe erkennen, Windpark-Betreiber die Vermarktung ihres Stroms optimieren.“

In manchen Bereichen fehlt es allerdings an geeigneten Daten, mit denen sich Prognosen erstellen lassen – entweder weil sie nicht erhoben bzw. langfristig gespeichert werden oder weil der Datenschutz deren Nutzung einschränkt. In solchen Fällen arbeitet das Fraunhofer IEE mit physikalischen Modellen oder speziellen KI-Verfahren wie dem Transfer-Learning „Hier geht es zum Beispiel darum vorherzusagen, wie Solarspeicher oder Wärmepumpen in einem Quartier in den nächsten Stunden eingesetzt werden, wie groß der Wärmebedarf sein wird oder wie viele Elektroautos wann mit welcher Leistung geladen werden. Das ist Voraussetzung, deren Flexibilitäten für die Stabilisierung der Stromnetze nutzbar zu machen“, erläutert Dobschinski.

Automatisiert Entscheidungen treffen

Ein weiteres zentrales Aufgabenfeld des Fraunhofer IEE ist der Einsatz von KI zur Entscheidungsunterstützung. „Wir entwickeln unter anderem so genannte Agenten, die KI-gestützt automatisierte Entscheidungen treffen“, erklärt Wickert. Diese Agenten helfen zum Beispiel Betreibern virtueller Kraftwerke und anderen Aggregatoren im Energiehandel, indem sie auf Basis von Handelsdaten

und Preisinformationen selbsttätig für die optimale Vermarktung des Stroms an den einzelnen Märkten, etwa an dem für Regenergie oder am Spotmarkt, sorgen. „Da mit der zunehmend fluktuierenden Erzeugung der Kurzfristhandel immer wichtiger wird, gewinnt die Automatisierung von Entscheidungen hier stark an Bedeutung“, so Wickert. Das System des Fraunhofer IEE ist längst etabliert in der Energiewirtschaft. So vermarktet einer der Anwender, ein Betreiber virtueller Kraftwerke, damit ein Portfolio mit einer Leistung von mehr als vier Gigawatt.

Auch beim Netzbetrieb leisten die Systeme des Fraunhofer IEE für die KI-basierte Entscheidungsunterstützung wertvolle Dienste. Mit der Zunahme der fluktuierenden Einspeisung aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie der wachsenden Zahl neuer Verbraucher wie Wärmepumpen und Wallboxen müssen die Netzbetreiber künftig weit häufiger in die Verteilnetze eingreifen als es bislang der Fall war. Dabei unterstützen Produkte des Fraunhofer IEE: Sie liefern beispielsweise Vorlagen für mögliche Handlungen, mit denen die Leitwarten der Netzbetreiber kritische Situationen schnell und zuverlässig in den Griff bekommen können. Ebenso machen sie es möglich, dass sich Verteilnetze selbst „heilen“ – kommt es in einer Leitung oder an einem Netzverknüpfungspunkt zu einem Ausfall, leitet das System die Stromflüsse automatisch so um, dass die Funktionsfähigkeit des Netzes gewährleistet bleibt.

Darüber hinaus entwickeln die Fraunhofer-Forscher:innen IT-Lösungen, mit denen Aggregatoren dezentrale Anlagen so steuern können, dass deren Flexibilitäten maximal wirtschaftlich eingesetzt werden. Zum Beispiel Batteriespeicher: Ein vom Fraunhofer IEE entwickeltes System erstellt auf Basis von Preis- und Lastinformationen sowie der Ladezustände Fahrpläne, die den optimalen Betrieb der Speicher ermöglichen.

Digitalisierung beschleunigt Erneuerbaren-Ausbau

Ebenso wirkt das Institut mit seiner KI-, Prognose- und Analysekompetenz daran mit, den Ausbau der erneuerbaren Energien zu beschleunigen. So ermitteln die Expert:innen zum Beispiel im Auftrag von Bund, Ländern und Kommunen anhand von GIS-Daten, auf welchen Flächen wie viele Windenergieanlagen mit welcher Leistung installiert werden können – unter Berücksichtigung etwa von Abstandsregeln, dem Naturschutz oder von Einschränkungen durch den Flugverkehr.

Auch trägt das Fraunhofer IEE dazu bei, die Planungsprozesse bei der Windenergie zu verkürzen. Die Wissenschaftler haben zum Beispiel ein Verfahren entwickelt, das den Zeitaufwand für das Erstellen von Windertragsgutachten deutlich reduziert: Statt wie üblich die Windgeschwindigkeiten über alle Jahreszeiten hinweg zu messen, erlaubt es die Lösung, sich dabei auf kürzere Zeiträume zu beschränken. Die Lücken werden mit Daten anderer Standorte geschlossen. Eine KI sorgt für deren Anpassung an die spezifischen Bedingungen vor Ort.

Energy Data Spaces: Daten austauschen, Souveränität behalten

Ein großes Hemmnis bei der Digitalisierung des Energiesystems ist, dass es Unternehmen bislang an Möglichkeiten fehlt, Daten auszutauschen, ohne die Hoheit darüber abzugeben. Das Fraunhofer IEE hat deshalb zusammen mit Partnern Datenräume geschaffen, die hier Abhilfe schaffen sollen: Die so genannten Energy Data Spaces erlauben es, Daten zu teilen, zugleich aber die Souveränität über sie zu behalten.

Welchen Nutzen hat das in der Praxis? Die einzelnen Netzbetreiber können beispielsweise in



Dr. Jan Dobschinski, Leiter des Forschungsschwerpunkts Energiemetereologie und Geoinformationssysteme

einem solchen Datenraum ihre Statistiken zu selten auftretenden Fehlern einer KI zur Verfügung stellen, so dass diese aus den gesammelten Daten ein Modell mit hoher Genauigkeit entwickeln kann. Davon profitieren alle Beteiligten, etwa bei der vorausschauenden Wartung („Predictive Maintenance“), ohne ihre Daten aus der Hand geben zu müssen. Ein weiteres Beispiel: Windparkbetreiber können über die Datenräume den Netzbetreibern für deren Sicherheitsberechnungen Zugriff auf detaillierte Erzeugungsdaten einräumen.

„Energy Data Spaces ermöglichen nicht nur eine engere Zusammenarbeit von Unternehmen, sondern stärken auch deren Resilienz“, sagt Wickert. „Denn sie machen es möglich, unternehmensübergreifend KI zu nutzen, ohne sich dafür von einem der großen kommerziellen Cloud-Anbieter aus den USA abhängig machen zu müssen.“



Prognosen helfen Netzbetreibern unter anderem dabei, drohende Netzengpässe zu erkennen

Unsere Forschungsthemen

- IT-Architekturen für energiewirtschaftliche Prozesse
- Künstliche Intelligenz für die Energiewirtschaft
- Aggregationsinfrastrukturen, Automatisierung von Prozessketten
- Konzeption resilienter digitaler Energiesysteme
- Technologien für digitale Geschäftsmodelle
- GIS-basierte Regionalisierung von Erzeugern und Verbrauchern
- Verfahren zur optimierten Standortbewertung
- Zeitreihen für die Systemanalyse und Netzplanung
- Prognosen für Netzbetrieb und Stromhandel
- Wettergeführter Betrieb von Freileitungen
- Simulations- und Prognosemodelle

Kontakt

Fraunhofer IEE
Joseph-Beuys-Str. 8
34117 Kassel
Tel. +49 7294-0

info@iee.fraunhofer.de
www.iee.fraunhofer.de

Bildnachweis

Adobe Stock 2, 5, 14
Volker Beushausen 4, 5, 9, 12, 13
Fraunhofer IEE 6, 9, 10
Shutterstock 2, 13
Stadtwerke Bamberg 11
Benjamin Zweig 1, 8, 10, 15, 16