

## ANWENDUNGSFÄLLE

### FORSCHUNGSINTERESSE:

Welche Abhängigkeiten gibt es zwischen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), die zur Steuerung erneuerbarer Energie eingesetzt werden?

### VORGEHEN:

- Die Wissenschaftler\*innen identifizierten Anwendungsfälle, in denen sensible Abhängigkeiten zwischen dem Energieversorgungssystem und dem IKT-System zu erwarten sind.
- Auf Basis der Anwendungsfälle wählten die Wissenschaftler\*innen des Zukunftslabors Energie drei Quartiere aus, die den Untersuchungsrahmen der Forschungstätigkeiten bildeten. Sie ermöglichten eine umfassende Betrachtung der Wechselwirkungen von IKT in digitalisierten Energiesystemen, waren aber dennoch kleinskalig genug, um Energiesysteme komplett abbilden zu können.
- Aufbauend auf den Anwendungsfällen und den Quartiersbeschreibungen erstellten die Wissenschaftler\*innen Szenarien für die zukünftige Energieversorgung aller drei Quartiere.

### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Insgesamt sind in sechs Anwendungsfällen sensible Abhängigkeiten zwischen dem Energieversorgungssystem und dem IKT-System zu erwarten. 1. Effizienz und Optimalität: der Einfluss verschiedener digitaler Mess- und Überwachungssysteme auf die Effizienz des Energiesystems 2. Technologieakzeptanz: Akzeptanzfaktoren und Nutzungsbereitschaft von Anwender\*innen gegenüber verschiedenen digitalen Mess- und Überwachungssystemen. 3. Gebäudeoptimierung: die autonome Energieoptimierung von Gebäuden auf Basis lokaler Flexibilität. 4. Verbundoptimierung: die optimierte Energieerzeugung und -verbrauch durch eine gleichmäßige Bewirtschaftung von Gebäuden im Verbund. 5. Flexibilitätsvermarktung: flexible Vermarktung von Energieüberschüssen an Dritte (z. B. Netzbetreiber). 6. Robuster Netzbetrieb: die robuste und stabile Betriebsführung eines digitalisierten Energiesystems.
- Die Wohnquartiere „Am Ölper Berge“ in Braunschweig und „Energetisches Nachbarschaftsquartier“ (ENaQ) in Oldenburg sowie das Wohn- und Gewerbegebiet „Rüsdorfer Kamp“ in Heide eignen sich, um unterschiedliche Aspekte zu betrachten: Art der Gebäude (Wohn- und Gewerbegebäude), Fertigstellung des Quartiers (bereits vorhanden oder in Planung), Stand der Energieversorgung (fossile Energieträger versus erneuerbare Energien).
- Für alle drei Quartiere liegen Beschreibungen für die zukünftige Energieversorgung vor. Diese umfassen z. B. die Nutzung zentraler Wärmepumpen im Quartier, die Verwendung industrieller Abwärme, die Erzeugung von Strom durch Solarenergie und der Einsatz eines Energie-Management-Systems zur Reduzierung von Lastspitzen.
- Basierend auf den Anwendungsfällen wurden im Projekt Durchstichszenarien definiert.

## DURCHSTICHSZENARIEN

### FORSCHUNGSINTERESSE:

Welche Abhängigkeiten zwischen dem Energieversorgungssystem und dem IKT-System sind sensibel bzw. kritisch?

### VORGEHEN:

Die Wissenschaftler\*innen konkretisierten die sechs identifizierten Anwendungsfälle und leiteten daraus Durchstichszenarien ab. In den Durchstichszenarien analysierten die Wissenschaftler\*innen unterschiedliche Schwerpunkte und Problemstellungen.

### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

Insgesamt betrachten die Wissenschaftler\*innen fünf Durchstichszenarien. 1. Flexibilität: Nutzung von Flexibilität eines Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystems zur Lösung von Problemen im Stromnetz. 2. IKT-Störungen: Auswirkungen eines Komponentenausfalls auf andere Komponenten. 3. Elektromobilität: Auswirkungen der zunehmenden Anzahl von Elektrofahrzeugen auf das lokale Niederspannungsnetz eines bestehenden Quartiers. 4. Gebäude: Simulation der Lastgänge eines Mehrfamilienhauses. 5. Netzbetrieb: Sicherung und Stabilität des Netzbetriebes in zunehmend digitalisierten Energiesystemen.

## DURCHSTICHSZENARIO ELEKTROMOBILITÄT

### FORSCHUNGSINTERESSE:

Wie viele Elektrofahrzeuge können zeitgleich in einem Quartier geladen werden, ohne dass die Spannungsqualität des öffentlichen Verteilnetzes kritisch beeinflusst wird?

### VORGEHEN:

- Für das Szenario Elektromobilität untersuchten sie anhand des Quartiers „Am Ölper Berge“ (Braunschweig) die Netzaufnahmefähigkeit für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung der DIN EN 50160. Diese Europäische Norm legt Anforderungen für die Spannungsqualität in öffentlichen Verteilnetzen fest.

- Um die Netzaufnahmefähigkeit des Quartiers „Am Ölper Berge“ zu analysieren, entwickelten die Wissenschaftler\*innen mithilfe des mosaik-Frameworks eine Open-Source Co-Simulation. Diese dient dazu, die erforderlichen Komponenten des Energienetzes (Energiesystemmodelle, Steuerungsmodelle, Netzberechnung, Datenspeicherung etc.) nachzubilden und miteinander zu verbinden.
- Sie testeten mehrere Szenarien in der Co-Simulation. Zunächst simulierten sie die aktuelle Netzaufnahmefähigkeit des Quartiers. Daraufhin führten die Wissenschaftler\*innen Verbesserungsmaßnahmen durch, um die Netzaufnahmefähigkeit für das Laden von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. In mehreren Szenarien wurden die Wirksamkeit von nutzerseitigen Maßnahmen zur kooperativen Energieerzeugung und -speicherung (z. B. Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeicher) sowie intelligente Steuerungsstrategien (Nutzung der Flexibilität der Batteriespeicher zur Deckung des Ladeenergiebedarfs der Elektrofahrzeuge) analysiert.

#### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Die Simulationen zeigten, dass es keine nennenswerten Synergieeffekte für die Netzintegration der Elektrofahrzeuge gibt, wenn dem Energienetz lediglich regenerative Komponenten ohne Steuerung hinzugefügt werden.
- Allerdings heben intelligente Ladestrategien dieses Potenzial und führen zu einer verbesserten Spannungshaltung. Die Netzaufnahmefähigkeit kann um 23 % gesteigert werden, indem Komponenten (z. B. PV-Anlagen, Batteriespeicher und Energiemanagementsysteme) mit einem Netzkorrekturalgorithmus kombiniert werden. Der Algorithmus erkennt Spannungsbandverletzungen und weist das Energiesystem an, das vorhandene Flexibilitätspotenzial (z. B. von Batteriespeichern) zu nutzen, um eine Netzüberlastung zu verhindern und die Versorgungssicherheit weiterhin zu gewährleisten.
- Werden zusätzlich intelligente Ladestrategien eingesetzt, führt dies zu einer Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit für Elektrofahrzeuge um 43 %. Zu den intelligenten Ladestrategien zählen wir das prognosebasierte Laden (Ladevorgang wird zeitlich gestreckt, um die Belastung für das Stromnetz zu reduzieren), das Solarladen (Elektrofahrzeug wird bei einem Überschuss an Sonnenenergie geladen) und das Nachtladen (Laden zwischen 20 Uhr und 5 Uhr, wenn die Netzlast im Quartier vergleichsweise gering ist).

## DURCHSTICHSZENARIO NETZBETRIEB

#### FORSCHUNGSINTERESSE:

Wie kann der Netzbetrieb in digitalisierten Energiesystemen sicher und stabil gewährleistet werden?

#### VORGEHEN:

- Die Verbundpartner des Zukunftslabors Energie verfügen über in Niedersachsen geografisch verteilte Forschungslabore, mit denen verschiedene reale Komponenten heutiger und zukünftiger vermehrt digitalisierter Energiesysteme untersucht werden können. Im ersten Schritt koppelten die Wissenschaftler\*innen das Renewable Energy Lab der Hochschule Emden/Leer (intelligente Einbindung regenerativer Stromerzeugungsanlagen in das elektrische Verteilnetz unter Einsatz moderner Automatisierungstechnik) und das NESTEC Labor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (Emulationszentrum für Vernetzte Energiesysteme zur Erprobung des Realbetriebs).
- Dafür analysierten sie zunächst die IT-Strukturen der Labore hinsichtlich IT Sicherheit, Leistungsfähigkeit und potenzieller Übertragbarkeit. Kriterien für die Modellierung und Strukturierung der Versuche waren unter anderem eine aktuelle Relevanz der Anwendungsfälle in den Verteilnetzen wie etwa Engpassmanagement nach §14a EnWG. Außerdem wählten sie ein geeignetes repräsentatives Stromnetz aus, das sie der Untersuchung zugrunde legten. Darüber hinaus stellten sie Erzeugungs- und Verbrauchsdaten bereit und prüften die Hardware hinsichtlich der Sicherheit im Labor und der Integration von intelligenten Messsystemen. Schließlich führten sie erste Simulationen in einem Niederspannungsnetz mit 21 Netzteilnehmern durch bei dem Labor- und kommerzielle Hardware im Renewable Energy Lab (Emden) und DLR NESTEC (Oldenburg) eingesetzt wurde. Die Ergebnisse konnten auf dem ETG CIRED Workshop 2021 und ETG Kongress 2023 (ISBN:978-3-8007-6108-1) gezeigt werden.
- Im zweiten Schritt integrierten die Wissenschaftler\*innen eine Wärmepumpe aus dem Heizungslabor der Ostfalia Hochschule (beinhaltet alle wichtigen Anlagenbestandteile der Wärmeversorgung) in die Versuchsumgebung von der Hochschule Emden/Leer und des DLR. Dadurch erweiterten die Wissenschaftler\*innen die Laborkopplung um den in zukünftigen Stromnetzen bedeutenden Wärmesektor.

#### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Laborübergreifende Simulationen über weite Entfernungen hinweg sind möglich. Selbst Echtzeitanwendungen lassen sich realisieren, wenn diese bei der Entwicklung der Modelle von Anfang an mitgedacht werden. Die typischen Latenzen beim Informationsaustausch für Hin- und Rückweg lagen im Mittel bei 65 ms (Millisekunden).
- So konnte das Batteriespeichersystem im Emder Renewable Energy Lab die entstehenden Spannungsbandverletzungen durch den Ausfall von PV Einspeisungen rechtzeitig auffangen und damit zum sicheren Betrieb des elektrischen Netzes im DLR NESTEC in Oldenburg beitragen.
- Im Vergleich zwischen reinen Simulationen und Versuchen mit echten Komponenten hat sich als Vorteil herausgestellt, dass auch unerwartete Effekte oder Wechselwirkungen identifiziert werden, die in einer reinen Simulation möglicherweise nicht berücksichtigt wurden. Daneben lässt sich auch Zeit einsparen, indem nicht erst Modelle der realen Anlagen erstellt werden müssen, sondern direkt mit den echten Komponenten experimentiert werden kann.

## DURCHSTICHSZENARIO GEBÄUDE

#### FORSCHUNGSINTERESSE:

Wie sieht die zukünftige Energieversorgung von Gebäuden in einem Quartier aus?

#### VORGEHEN:

- Zunächst wird der thermische und elektrische Energiebedarf des Quartiers „Am Ölper Berge“ in Braunschweig im Referenzszenario (Baseline) analysiert. Diese Bewertung basiert auf den physikalischen Eigenschaften und Baumaterialien der thermischen Gebäudehülle (z. B. Fenster, Wände, Dach). Dabei werden für jedes Gebäude im Quartier spezifische Strombedarfsprofile generiert.
- Auf Grundlage der gesammelten Gebäudedaten wird ein Gebäudemodell nach dem 5R1C-Widerstands-Kapazitäts-Modell erstellt. Dieses Modell verwendet meteorologische Daten sowie die Gebäudeeigenschaften, um die Innentemperaturen und den Wärmebedarf der Gebäude zu berechnen.
- Die gesammelten Informationen der verschiedenen Gebäudetypen werden in Excel-Listen zusammengetragen und in Eingangsdaten für die Simulationen umgewandelt. Diese Daten bilden die Basis für die folgenden Analysen und Simulationen.



- Weitere Szenarien untersuchen die zukünftigen Energieverbräuche des Quartiers, wobei energetische Maßnahmen, wie z. B. Fassadendämmung oder der Austausch von Fenstern, berücksichtigt werden. Mehrere Konfigurationen für die Versorgung und Nutzung von Energie werden dabei simuliert.
- In den verschiedenen Zukunftsszenarien wird das Quartier um zusätzliche Komponenten erweitert, wie z. B. PV-Anlagen, Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge, Regelungstechnik, Energiespeicher oder Energiemanagementsysteme. Diese Komponenten werden über Co-Simulationen miteinander verbunden, um deren Einfluss auf das Energiesystem zu analysieren. Die unterschiedlichen Konfigurationen und Szenarien werden schließlich miteinander verglichen, um den Einfluss der verschiedenen energetischen Maßnahmen und Technologien auf das Energiesystem und den Gebäudebestand des Quartiers zu bewerten. Dies dient als Grundlage für die Auswahl optimaler Maßnahmen zur Energieversorgung und Effizienzsteigerung des Quartiers. Anschließend folgt eine ökologische Bewertung der Szenarien nach ÖKOBAUDAT und GEG.

#### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Im Bestandsquartier liegen ähnliche Profile der Gebäude vor, deren Hauptunterschied in der Art der Warmwasserbereitung liegen. Die verschiedenen Szenarien führen zu unterschiedlichen Strom- und Wärmelasten je nach Konfiguration der Komponenten (z. B. Warmwasserbereitung, PV-Einsatz) und der Effizienz der Wärmepumpe. Außerdem wurde festgestellt, dass Spannungspegel durch Warmwasserbereitung mit Durchlauferhitzern gesenkt werden kann.
- Die steigende Nutzung von Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen und Strom in Pufferspeichern kann zu Netzüberlastungen und Spannungsbandverletzungen führen. Maßnahmen zur Reduktion dieser Netzüberlastungen, wie die Nutzung von Flexibilitäten in elektrischen Speichern, erhöhen die Resilienz des Verteilnetzes. Ein Zukunftsszenario für das Jahr 2045 zeigt, dass der Wärmebedarf, der Strombedarf und die Systemverluste durch verbesserte Gebäudehüllen, optimierte PV-Nutzung und einen effizienteren Betrieb von Wärmepumpen deutlich reduziert werden können.

## DURCHSTICHSZENARIO IKT-STÖRUNGEN

#### FORSCHUNGSINTERESSE:

Wie können Stromversorgungssystem und Kommunikationssystem in einer Simulation gekoppelt werden und wie wirken sich Kommunikationsprobleme auf die Leistung des Netzes aus?

#### VORGEHEN:

- Aus dem Forschungsinteresse lässt sich ableiten, dass ein Mehrdomänensystem modelliert werden muss, welches die Stromversorgung des Netzes, die Steuerungssysteme sowie ein Modell der bidirektionalen Kommunikation abbildet. Außerdem wird eine Fallstudie erstellt, um die Auswirkungen von Kommunikationsproblemen in einer realen Umgebung zu quantifizieren. Die Kopplung der Systeme erfolgt über das Co-Simulationstool mosaik.
- Das Stromsystemmodell umfasst verschiedene Komponenten zur dezentralen Energieversorgung im Quartier und sorgt für den Energie- und Leistungsflussausgleich im Netz. Das Gebäudeenergiemanagementsystem (BEMS) überwacht den Lastenausgleich zwischen Energiequellen und Verbrauchern, wie Haushaltslast, Speicher und Elektrofahrzeugladestationen.
- Das zentrale Quartiersenergiemanagementsystem (CEMS) überwacht das Netz und löst Spannungsprobleme durch Nutzung von Speicherflexibilität. Es simuliert die Stromflüsse im Quartier und leitet Informationen an die BEMS weiter. Die BEMS regulieren das Laden und Entladen der Batterien, um beispielsweise bei Netzüberlastungen Strom einzuspeisen. Dadurch wird die Netzbelastung verringert und die Spannungsniveaus bleiben im Rahmen der durch die DIN EN 50160 festgelegten betrieblichen Standards.
- Das Kommunikationsmodell (OMNET++) simuliert die Datenübertragung zwischen dem CEMS und den BEMS, um Netzoptimierungen durchzuführen. Hierzu wurde ein Kommunikationsmodell entwickelt, das jeden dezentralen Agenten mit dem zentralen Agenten verbindet, um die Datenübertragung zwischen den Agenten realitätsnah zu simulieren.
- Bewertungsziele des Durchstichszenarios sind die Verzögerungen bei der Übertragung und Berechnung der Flexibilitätsleistung sowie die Latenzzeiten beim Datenaustausch zwischen zentralen und dezentralen Agenten zu ermitteln.

#### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Die Simulationsergebnisse zeigen die Machbarkeit der Umsetzung eines Mehrdomänensystemmodells mit den verwendeten Tools. Erste Ergebnisse zeigen eine mittlere Latenz von etwa 300 ms für den Datenaustausch. Eine wichtige Rolle spielt die Latenz in der Cloud-simulierten Internetverbindung zwischen dem zentralen Agenten (der als gehostet an einem entfernten Standort simuliert wurde) und der lokalen Internetverteilungspunkte. Die Verzögerungen bei der Spannungsanpassung resultieren aus der Berechnungs- und Kommunikationslatenz, was zeitweise Instabilitäten im Netz verursacht. Die Mean Time of Failure (MTOF) beträgt etwa 474 ms, bedingt durch Berechnungszeit (120 ms) und Kommunikationsverzögerung (350 ms).

## DURCHSTICHSZENARIEN FLEXIBILITÄT

#### FORSCHUNGSINTERESSE:

Wie können mithilfe von Flexibilität von Strom und thermischen Energiesystemen Schwankungen im Stromnetz ausgeglichen werden?

#### VORGEHEN:

- Digitale Technologien sollen eine zuverlässige Energieversorgung sicherstellen, da erneuerbare Energie nicht konstant abgerufen werden können. Zudem führt der steigende Energiebedarf von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen, zu höheren Lastspitzen im Netz. Hier kommen Flexibilitäten ins Spiel. Dabei handelt es sich z. B. um überschüssige Energie (etwa an sehr sonnigen Tagen), die gespeichert und zu Zeitpunkten genutzt wird, in denen ein Energiemangel herrscht. Eine Nutzung der Flexibilitäten im Quartier erfordert, dass mehrere Knoten im Netz miteinander kommunizieren, um die verfügbare Flexibilität zu verteilen.
- Hierfür simulierten die Wissenschaftler\*innen Gebäude einschließlich der Versorgungssysteme, um die Flexibilität der Anlagen zu ermitteln. Zur Erstellung dieser Flexibilitätsprognose ist zunächst ein Fahrplan erforderlich, der auf dem Ansatz der „perfekten Prognose“ basiert. Dieser Fahrplan berechnet im Voraus die Energieflüsse zwischen den verschiedenen Komponenten.
- Danach wird die Flexibilität für einen definierten Zeitraum berechnet. Diese Flexibilität ist ein multidimensionaler Parameter, der die maximale und minimale Leistung und die maximale und minimale verfügbare Energie der Speichersysteme berücksichtigt.
- Die Flexibilität wurde dann in einem Multi-Agenten-System überführt, um die Energieflüsse im Quartier zu optimieren, mit dem Ziel, die Lastspitzen zu reduzieren und um das Stromnetz unter validen Betriebsbedingungen wie Spannungsniveaus zu halten.
- Ein wichtiger Bestandteil des Szenarios ist ein Gebäudemodell, das verschiedene Gebäude und Anforderungen an die Energieversorgung beschreibt. Dieses Modell dient dazu, den Wärmebedarf zu berechnen, der in Verbindung mit den Pufferspeichermodellen steht.

#### ERGEBNISSE/ERKENNTNISSE:

- Die Wissenschaftler\*innen entwickelten ein umfangreiches Gebäudemodell, das zur Simulation der Energieversorgung dient. Das Modell enthält Komponenten, durch die Gebäude Flexibilitäten bereitstellen können. Dazu zählen Energiespeicher (z. B. Batteriespeicher, Warm-Wasser-Speicher, Heizungsspeicher) und die thermische Masse eines Gebäudes (z. B. speichert ein Klinkerbau Wärme länger als ein Holzbau).
- Außerdem sind Belegungsprofile für Räume und Gebäude enthalten, um die Nutzungsart des Gebäudes spezifizieren zu können. Belegungsprofile geben Aufschluss darüber, an welchen Tagen und zu welchen Uhrzeiten Energie in Form von Wärme und Strom im Gebäude verbraucht wird.
- Das Multi-Agenten-System erlaubt eine Optimierung der Beladung der Speicher. Bei den thermischen Systemen, bedeutet dies eine längere Haltung der Temperaturen im Pufferspeicher, ohne dass dies parallel zu einem höheren Bedarf am Strom führt. Dazu werden Lastspitzen im Quartier vermieden. Wenn elektrische Speicher für Flexibilität im Stromnetz benutzt werden, erbringt die Multi-Agenten-Optimierung einen reduzierten Bedarf von Ladung und Entladung in den Batteriesystemen. Dadurch werden die Ziele der Reduzierung der Parallelnutzung, der Haltung der Spannungsniveaus in den Betriebsgrenzen und der Deckung des erforderlichen Energiebedarfs erfüllt. Außerdem zeigen die Ergebnisse eine bessere Nutzung der Kapazitäten der Speichervolumen. Dies würde somit kleinere Speicher erlauben.