

# Lokale und regionale Sektorenkopplung in Regionen, Städten und Quartieren

In diesem Artikel sollen die Potenziale und Herausforderungen der Sektorenkopplung auf regionaler und lokaler Ebene erörtert werden. Die AG Energiebilanzen hat Zahlen des Endenergieverbrauches aus dem Jahr 2017 veröffentlicht. Dabei machen der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte sowie des Verkehrs jeweils mehr als ein Viertel des Gesamtverbrauchs aus. Die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in diesen Bereichen kann vorzugsweise lokal/regional erfolgen.

Eine große Herausforderung stellt die Defossilierung des Bereichs Mobilität dar. Dies kann durch eine Elektrifizierung gespeist mit Strom aus erneuerbaren Energien (EE) realisiert werden. Durch eine Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität wird eine signifikante Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf regionaler und lokaler Ebene erreicht. Eine gezielte lokale Betriebsführung kann neben der Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auch zu einer Entlastung der höheren Stromnetzebenen führen und Einspeisemanagementmaßnahmen – Abregelung von EE-Anlagen – reduzieren.

Im Folgenden werden verschiedene Aspekte der Sektorenkopplung auf regionaler und lokaler Ebene betrachtet.

1. Zunächst wird ein Energieversorgungsszenario für das Jahr 2050 (80-90% CO<sub>2</sub>-Reduktion) beschrieben, und die Bedeutung der Sektorenkopplung dargelegt.
2. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die Anforderung an Flexibilitäten im Stromsystem ist, um Abregelungsvorgänge zu reduzieren.
3. Das Energiewaberkonzept hebt die lokale Energievermarktung zur Entlastung der Übertragungsnetze in einen überregionalen und länderübergreifenden Kontext.
4. Das RE<sup>3</sup>ASON-Modell analysiert die Optionen für Energiesystemdesigns von Gemeinden und beteiligt die Bürgerinnen und Bürger bevor es konkrete Handlungsempfehlungen ableitet.
5. Im letzten Teil werden konkrete Umsetzungsprojekte für zukunftsfähige Energieversorgungssysteme auf regionaler (Gemeinde) und lokaler (Stadtquartiere) Ebene vorgestellt.

## 1. Energieversorgungsszenarien im Kontext der Sektorenkopplung auf regionaler Ebene (Baden-Württemberg)

Um der wesentlichen Ausgleichswirkung durch das Stromnetz innerhalb Deutschlands wie auch darüber hinaus Rechnung zu tragen, erfordert eine Untersuchung der regionalen Ausgestaltung der Sektorenkopplung eine überregionale Modellierung. So wurde das REMix-Energiesystemmodell des DLR zuletzt innerhalb verschiedener Studien mit einer regionalisierten Betrachtung Deutschlands und unter Berücksichtigung des europäischen Stromausbaus angewendet (Gils 2015, Schick et al. 2018, Lechtenböhmer et al. 2018). Dabei wurden Szenarien für das Jahr 2050 mit einer CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion um 80-90% in das Modell eingebunden. In der angewendeten Konfiguration umfasst das Modell nicht nur den Stromsektor, sondern auch alle wesentlichen Sektorenkopplungsoptionen einschließlich KWK, elektrischer Wärmeerzeugung in Wärmepumpen und Elektrokesseln, Batterieelektromobilität sowie die Erzeugung von Wasserstoff für den Verkehrssektor und die Industrie. Durch Einbindung thermischer und chemischer Speicher, sowie die Betrachtung gesteuerten Ladens sind all diese Technologien als flexible Lasten modelliert. Sie konkurrieren somit um den Ausgleich fluktuierender Wind- und Solarstromerzeugung mit Stromspeichern und dem überregionalen Stromausbau. In den Modellergebnissen für die Szenarien wird dieser Lastausgleich durch das Stromnetz und flexible Sektorenkopplung dominiert. Letztere erweist sich insbesondere als wirkungsvoll beim Ausgleich starker kurzfristiger Veränderungen in der EE-Stromerzeugung (► *Abbildung 1*).

Die Ergebnisse zeigen weiterhin einen deutlichen Rückgang des Bedarfs an Stromspeichern durch eine flexibel ausgelegte Sektorenkopplung. So zeigt das Ladeverhalten der Batterieelektrofahrzeuge eine klare Korrelation mit der EE-Erzeugung, wie auch der Betrieb der Wasserstoffelektrolyseure und der Wärmepumpen in der netzgebundenen Versorgung. Dabei stehen die verschiedenen Sektorenkopplungsoptionen nur bedingt in Konkurrenz zueinander und weisen vielmehr eine positive Rückkopplung bei Kombination auf.



*Fraunhofer IEE*  
Dr. Dietrich Schmidt  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de



*DLR*  
Dr. Karsten von Maydell  
karsten.maydell@dlr.de

*DLR*  
Dr. Hans-Christian Gils  
hans-christian.gils@dlr.de

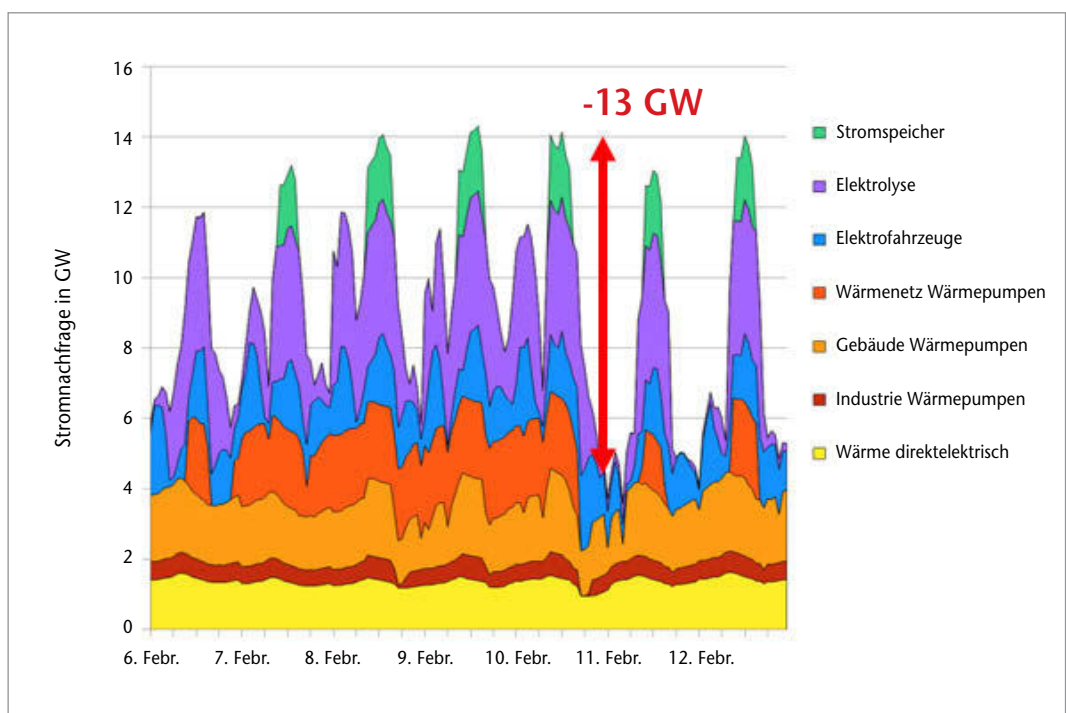
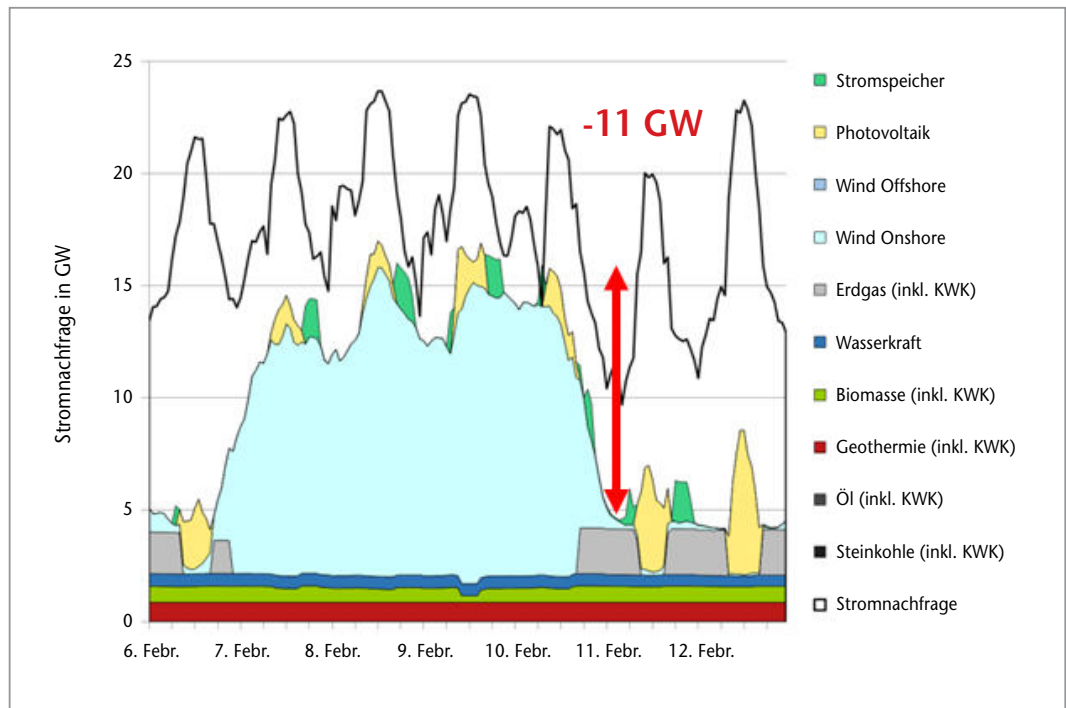
*Fraunhofer ISE*  
Gerhard Stryi-Hipp  
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

*IZES*  
Juri Horst  
horst@izes.de

*KIT*  
Prof. Dr. Wolf Fichtner  
wolf.fichtner@kit.edu

Regionale Unterschiede in der Ausgestaltung der flexiblen Sektorenkopplung ergeben sich überwiegend dann, wenn ein Ausbau des Stromnetzes nicht oder nur in begrenztem Maße möglich ist. So wird eine Flexibilisierung der KWK-Versorgung und Wasserstofferzeugung in von Windkraft dominierten Regionen forciert, während ein gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen in von Photovoltaik (PV) dominierten Regionen eine erhöhte Bedeutung hat.

Abbildung 1  
**Beispiel des stündlichen Systembetriebs**  
 in Baden-Württemberg  
 in einem Szenario für 2050.  
 oben: für die Erzeugungsseite  
 unten: für die flexible Stromnachfrage



## 2. Einsatz von lokalen Flexibilitäten zur Reduktion von Abregelungsvorgängen

Das Projekt „ENERA“ ist eines der 5 Projekte im Programm „Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“ (SINTEG). Es adressiert die Themenschwerpunkte Netz, Markt und Daten in einer Netzregion im Nordwesten Deutschlands (Ostfriesland). Innerhalb des Projektes sollen durch den Einsatz flexibler Erzeuger, Verbraucher und Speicher und durch die Ertüchtigung des Netzes mit neuen Betriebsmitteln das Energiesystem flexibilisiert sowie regionalisierte Stromprodukte gehandelt werden. Hohe EE-Einspeisung und nicht ausreichende Übertragungskapazitäten des elektrischen Netzes – vor allem des Übertragungsnetzes – führen vermehrt zur Abregelung (Einspeisemanagement) von EE-Anlagen. Dies führt zu einer Ineffizienz bei der Energiewandlung aus EE-Quellen, da „sauber“ erzeugter Strom durch die Abregelung „weggeworfen“ und meist durch Redispatch durch konventionelle Kraftwerke subventioniert wird.

Ein Ziel der Arbeiten des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme im Projekt ist es, diese abgeregelte bzw. „weggeworfene“ Energie in flexiblen Energieanlagen sinnvoll zu nutzen. Zur Ermittlung des Flexibilitätsbedarfs wurden mittels eines entwickelten Modells die aufgrund von Abregelung nicht genutzte jedoch potenziell zur Verfügung stehende Leistung bzw. Energie bestimmt. In der ENERA-Region zeigt sich, dass es bestimmte Versorgungsbezirke gibt, in denen besonders viel EE-Energie abgeregelt wird. In diesen Bezirken könnten flexible Energieanlagen besonders effizient die vorhandenen Engpässe beseitigen. Zur Abschätzung geeigneter Energieanlagen zur Lösung von Engpässen, wurden aus den abgeregelten Leistungszeitreihen die Jahresdauerlinien gebildet. Es zeigt sich, dass eine sehr begrenzte Zeit im Jahr sehr „hohe“ Leistungen typischerweise abgeregelt werden (Peters et al. 2018). Zur Nutzung der abgeregelten Energie in Engpässen würden folglich flexible Energieanlagen mit einer hohen Anschlussleistung benötigt.

## 3. Überregionale Flexibilitätsvermarktung zur Reduktion von Netzengpässen – Das Energiewabenkonzept

Da die verfügbaren Ressourcen an steuerbaren erneuerbaren Energien wie Biomasse und Geothermie in Mitteleuropa begrenzt sind, muss ein Großteil der Stromversorgung durch fluktuierend einspeisende erneuerbare Energien (fEE, hier Wind- und Solarenergie sowie Fließgewässer) erfolgen. Diese sind im Gegensatz zu den heutigen thermischen Großkraftwerken dezentral in Verteilnetze eingebunden. Elektrische Energie kann im Vergleich zur chemisch

gebundenen Energie in Brennstoffen nur schlecht mittel- und langfristig gespeichert werden. Aus Gründen der Systemstabilität (Frequenz- und Spannungshaltung) müssen jedoch Stromerzeugung und -verbrauch zu jeder Zeit im Gleichgewicht sein. Daher bedarf ein System, welches insbesondere auf dezentral verteilte fEE aufsetzt, einer komplexen Mess- und Steuerungsinfrastruktur, welche neben fEE auch andere Flexibilitätsoptionen (Lastmanagement von Verbrauchern, steuerbare Kraftwerke und Speicher) einbezieht, um die Systemstabilität zu gewährleisten. Zudem sind gute Wetter- und Verbrauchsprognosen sowie gute Steuerungsalgorithmen in den Leitwarten notwendig.

Hier setzt das Interreg V A-Projekt Energiewaben an (<https://energiewaben-gr.eu/>). Es untersucht ein Konzept für eine zukünftige Energieversorgung auf Basis von fEE. Dabei wird ein dezentraler Ansatz verfolgt, der sogenannte Energiewabenverbund. Das Optimierungsziel im Energiewabenprojekt ist die Versorgung aus fEE zu maximieren und deren Abregelung – die im derzeitigen System aufgrund verschiedener Restriktionen erfolgt – möglichst zu vermeiden. Insbesondere werden aber Möglichkeiten eines länderübergreifenden Verbunds von Energiewaben in Grenzregionen auf Verteilnetzebene im Sinne der europäischen Energieunion analysiert. Die Großregion Saar-Lor-Lux bietet als Untersuchungsraum hierfür die besten Voraussetzungen.

Eine Energiewabe stellt eine abgegrenzte Region dar, die sich wie ein Bilanzkreis zusammensetzt und sich innerhalb dieser Grenzen selbst optimiert. Zu diesem Zweck werden Stromerzeugungsanlagen und verschiedene flexible Verbraucher gesteuert, wobei die Versorgungssicherheit auch weiterhin gewährleistet bleiben muss. Eine Energiewabe wird dabei ausdrücklich nicht als autarkes System innerhalb der nationalen Stromversorgung geschaffen. Sie verfolgt vielmehr das Ziel, in einem Umfeld zunehmend dezentraler Stromerzeugung (virtuelles Kraftwerk) lokale und regionale Ausgleichseffekte auf Erzeuger- und Verbraucherseite zu nutzen. Auch kommunizieren benachbarte Waben miteinander und tauschen Strommengen aus, so dass diese noch weiter optimiert werden können.

Gesteuert werden Erzeugung und Verbrauch von einer Leitzentrale, in welcher auch Mess- und Prognosedaten zusammenlaufen. Steuerungsalgorithmen passen dabei in einer 15-Minuten-Taktung für die jeweils kommenden 36 Stunden rollierend den Einsatz aller Flexibilitätsoptionen an. An die Leitwarte ist auch ein sogenannter Online-Regler angebunden. Bei diesem handelt es sich bspw. um einen Speicher(verbund), der prognostizierten Stromverbrauch und Erzeugung innerhalb einer Handelsperiode von 15 Minuten bilanziell im Gleichgewicht hält.

#### 4. Energiesystemdesign einer Gemeinde: Bürgerbeteiligung für einen energetischen Nachhaltigkeitsprozess

In Städten und Gemeinden bestehen große Nachhaltigkeitspotenziale, insbesondere durch die Nutzung erneuerbarer Energien sowie durch nachfrageseitige Maßnahmen wie die energetische Sanierung von Wohngebäuden. In vielen Fällen bestehen Synergie- aber auch Konkurrenzeffekte zwischen diesen Maßnahmen. Insbesondere kleinere Gemeinden sind jedoch meist aufgrund personeller und finanzieller Einschränkungen nicht in der Lage, diese Potenziale zu quantifizieren und vielversprechende Maßnahmenkombinationen identifizieren zu können.

Zur Unterstützung solcher Gemeinden wurde das RE<sup>3</sup>ASON-Modell entwickelt, mit dem das bestehende Energiesystem einer Gemeinde (insb. Nachfragestruktur, Gebäudebestand und Potenziale für erneuerbare Energien, ► *Abbildung 2 Teil a*) analysiert werden kann. Weiterhin kann das Modell genutzt werden, um Alternativen für die zukünftige Gestaltung des kommunalen Energiesystems mit verschiedenen Zielsetzungen und Rahmenbedingungen zu generieren.

Für die Akzeptanz sämtlicher Empfehlungen ist die Einbeziehung der lokalen Akteure von großer Bedeutung. Im Rahmen einer Fallstudie wurde daher die Interaktion mit Gemeindevertretern gesucht, um Werte, Ziele und Präferenzen der lokalen Akteure bei der Entscheidungsfindung in einem iterativen Prozess zu berücksichtigen (► *Abbildung 2 Teil c*).

Die Ergebnisse der Fallstudie demonstrieren u. a. den Mehrwert durch die Interaktion mit der Gemeinde: Werden lediglich die Kosten, Emissionen oder Energie-

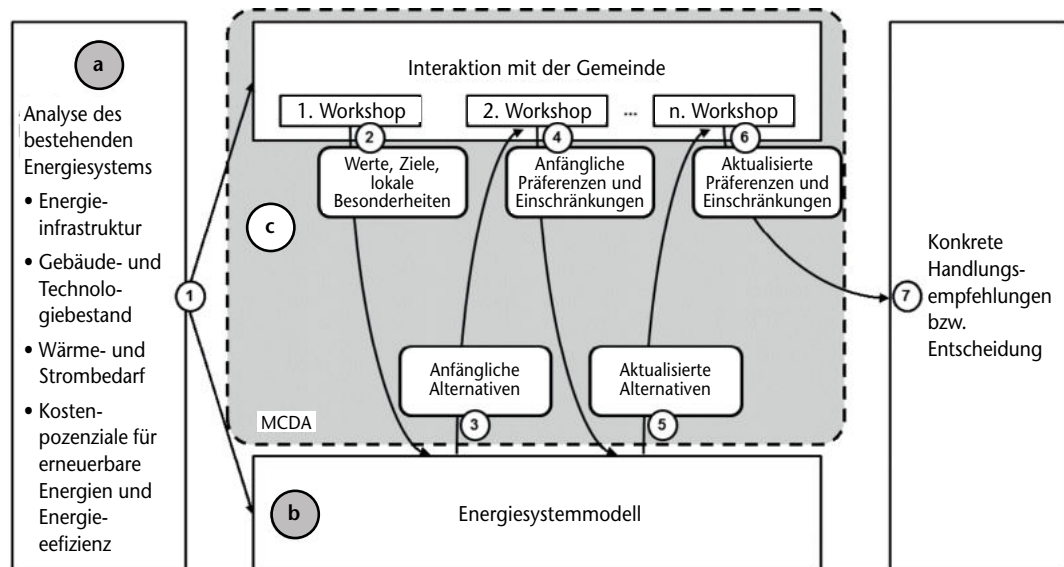
importe minimiert, ergeben sich wenig attraktive Alternativen mit teilweise extremen Empfehlungen, wie bspw. die ausschließliche Nutzung von Pelletheizungen. Werden jedoch die Präferenzen der Gemeindevertreter zur Bewertung der Alternativen herangezogen, ergeben sich ausgewogenere Empfehlungen, die einen sinnvollen Kompromiss zwischen den Zielwerten Kosten, Emissionen und Energieimporte darstellen. Erreicht werden diese Alternativen u. a. durch Sektorkopplung auf der regionalen Ebene, z. B. durch die Nutzung der Stromerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen in Wärmepumpen, sowie durch die energetische Sanierung insbesondere älterer Gebäude in der Gemeinde (McKenna et al. 2018).

#### 5. Einige konkrete Projekte/Reallabore zur Umsetzung zukunftsfähiger Energieversorgungskonzepte auf regionaler und lokaler Ebene:

- **Fliegerhorst Oldenburg – [www.enaq-fliegerhorst.de](http://www.enaq-fliegerhorst.de)**

Auf einem ehemaligen Militärgelände, dem Fliegerhorst in Oldenburg, wird innerhalb eines Forschungsprojektes in den kommenden Jahren ein Smart City-Wohnquartier mit etwa 110 Wohneinheiten entstehen, in dem der Energiebedarf zum größten Teil aus lokal erzeugter Energie gedeckt werden wird. Das Vorhaben ist eines von sechs Leuchtturmprojekten der Ausschreibung „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ in Oldenburg. Im Fokus der Arbeiten stehen neben einem innovativen Energieversorgungskonzept ein intensiver Partizipationsprozess der Bürger sowie die Ertüchtigung eines lokalen Energiehandels

Abbildung 2  
**Gestaltung von Energiesystemen für Gemeinden:**  
Vorgehensweise bei der Ableitung von Handlungsempfehlungen.  
In Anlehnung an McKenna et al. (2018).



- **Pfaff Nähmaschinenwerk Kaiserslautern**

Das Gelände des früheren Nähmaschinenwerkes Pfaff in Kaiserslautern wird in den nächsten Jahren ein ganzheitlich optimiertes Energieversorgungssystem für eine CO<sub>2</sub>-emissionsfreie Energieversorgung im Rahmen der Umsetzung eines Reallabors für smarte Quartiere erhalten. Das Vorhaben wird ebenfalls als eines der Leuchtturmprojekte der Ausschreibung „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ gefördert. Besonderes Augenmerk wird in dem Vorhaben auf die Nutzung von Synergien durch die Integration von zentralen und dezentralen Systemen und Speichern, sowie eine Verknüpfung aller Bausteine durch ein agentenbasiertes Energiemanagementsystem mit Blockchain-Technologie gelegt.

- **Geo-Solare Wärmeversorgung für das Neubauquartier „Zum Feldlager“ in Kassel**

Im Rahmen einer detaillierten Untersuchung wurden die Möglichkeiten einer auf erneuerbaren Energien basierenden Wärmeversorgung unter Einbindung von Geothermie mit Großwärmepumpe, innovativen Niedertemperatur Wärmenetz und Solarthermie für ein Großstadtquartier untersucht. Das System stellt eine intelligente Verknüpfung erprobter Einzeltechnologien durch die Integration innovativer Fernwärme-Technologien und gebäudetechnischer Anlagen zusammen mit der Geothermie dar. Die Untersuchung zeigte die Möglichkeiten zur Übertragung des Konzeptes auf viele Neubausituationen und stellte Betriebsweisen der Wärmeversorgungsanlagen vor, wie sie für ein flexibles Energiesystem in der Kopplung der Sektoren Strom und Wärme notwendig sind.

- **Benjamin-Franklin-Village Mannheim**

Auf der 144 ha großen Konversionsfläche im Herzen Mannheims soll auf einem ehemaligen Militärgelände ein neuer Stadtteil mit einem beispielhaften Wärmeversorgungssystem für die Versorgung der Bestands- und Neubauten entstehen. Im Rahmen des Umbaus wird ein Wärmenetz erstellt werden, welches die anfallenden Abwärme-Potenziale aus den angrenzenden Gewerbeimmobilien integriert und lokal erzeugten PV-Strom und dezentrale Wärmepumpen einbindet. Durch die Größe des Areals und die Vielzahl der vorgesehenen Nutzungen wird ein Reallabor für zukünftige lokale Energiesysteme und den Test von Technologien entstehen.

- **Initiative zur Digitalisierung der Energiewirtschaft: Das Open District Hub**

Mit der Gründung des Vereins Open District Hub soll die Digitalisierung der Energiewirtschaft durch die Nutzung von Konzepten der Sektorkopplung vorangetrieben werden. Der Verein schafft einen Rahmen, um die Interessen des gesamten Wertschöpfungs-

netzes der Quartiersversorgung zu bündeln, inklusive Strom, Wärme, Raumklimatisierung und Mobilität. Die Grundlage dafür stellen Technologien und Forschungsergebnisse zur Digitalisierung dar, wie ein selbstlernendes Energiemanagementsystem, ein digitaler Blockchain-Marktplatz und ein auf künstlicher Intelligenz basierendes Cybersicherheitskonzept.

## Fazit

- Durch die Beispiele kann gezeigt werden, dass eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Bereich Raumwärme und Verkehr im Wesentlichen vor Ort, also lokal/regional zu lösen ist.
- Eine lokale Nutzung erzeugter Energien führt einen geringeren notwendigen Netzausbau mit sich. Forschungsergebnisse zeigen deutlich, dass ein gekoppeltes Energiesystem für die Erreichung der Energiewende nötig ist. Wie dies lokal realisiert werden kann, zeigt eine Reihe von zukunftsfähigen Quartiersbeispielen.
- Als zentrales Hemmnis für eine vermehrte Sektorenkopplung können die im Vergleich zu fossilen Brennstoffen hohen Strompreise genannt werden. Zur breiten Umsetzung der vielversprechenden Ansätze ist ein „even-level-playing-field“ für alle Energien notwendig.

## Referenzen

- Schick, C. et al. „Energiesystemanalyse Baden-Württemberg“, Abschlussbericht des Forschungsverbunds STRise
- Lechtenböhrer, S. et al. „RegMex - Modellexperimente und -vergleiche zur Simulation von Wegen zu einer vollständig regenerativen Energieversorgung: Schlussbericht“
- Gils, H. C. „Balancing of intermittent renewable power generation by demand response and thermal energy storage“ (2015), Dissertation, Universität Stuttgart
- D. Peters, S. Börries, R. Völker, M. Greulich, F. Schuldt und K. von Maydell, „Einspeisemanagement in der enera Region,“ Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien, Berlin, 2018.
- McKenna, R., Bertsch, V., Mainzer, K., Fichtner, W. (2018) „Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimisation to develop feasible energy concepts in small communities“, European Journal of Operational Research, Volume 268, Issue 3, 2018.