

# Sektorenkopplung als Baustein der Energiewende

Dieser Artikel ist der Frage gewidmet, welchen Beitrag eine verstärkte Sektorenkopplung zum Gelingen der Energiewende leisten kann. Ausgehend von einer Einführung der Prinzipien und Technologien bietet er Einblicke in die zur Erforschung der Sektorenkopplung angewendeten Methoden, sowie ausgewählte Ergebnisse.

Hinsichtlich der Energieversorgung versteht man unter Sektorenkopplung im Allgemeinen eine engere Verzahnung und Verknüpfung verschiedener Energieanwendungsbereiche, sowie die Zunahme von Verzweigungs- und Verknüpfungsstellen im Energiesystem. Die wesentlichen Anwendungsbereiche der Energie sind dabei die Bereitstellung von Strom, Wärme und Mobilität.

Eine Kopplung zwischen Strom- und Wärmeversorgung erzielt man zum einen durch die gemeinsame Erzeugung von Strom und nutzbarer Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), und zum anderen durch den Einsatz von Strom in Wärmepumpen und direkt-elektrischer Wärmeerzeugung.

Die Kopplung zwischen Strom- und Verkehrssektor umfasst batterieelektrische Fahrzeuge, die elektrolitische Gewinnung von Wasserstoff zur Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen, sowie die Erzeugung synthetischer flüssiger Kohlenwasserstoffe in Fischer-Tropsch-Reaktion zur Nutzung in konventionellen Verbrennungsmotoren.

Durch eine Methanisierung von Wasserstoff lässt sich zudem eine Verknüpfung zu den Infrastrukturen des Gasversorgungssystems herstellen. Sowohl die Methanisierung, als auch die Fischer-Tropsch-Reaktion benötigen CO<sub>2</sub>, das entweder aus fossilen oder erneuerbaren Kohlenstoffverbindungen gewonnen werden muss.

Weitere Sektorenkopplungen, z. B. Strom-Wärme-Strom-Systeme und elektrische Betriebsmittel im Gasnetz werden in diesem Beitrag nicht behandelt.

Während bei der Stromerzeugung in Deutschland und darüber hinaus in den letzten Jahren deutliche Steigerungen der Anteile erneuerbarer Energien (EE) erreicht wurden, bleiben der Verkehrs- und Wärmesektor weiterhin fast vollständig abhängig von fossilen Brennstoffen. Da die in Deutschland verfügbaren Ressourcen zur energetischen Biomassennutzung bei weitem nicht für eine Versorgung dieser Sektoren ausreichen und die zur Bereitstellung von Wärme vorhandenen Alternativen der Solarthermie und Geothermie auf Temperaturen von maximal 300 °C beschränkt sind, muss zur Senkung der sektoralen Treibhausgasemissionen – neben der Steigerung der Energieeffizienz – mittelfristig eine teilweise Elektrifizierung und/oder Umstellung auf regenerative synthetische Energieträger erfolgen.

Dabei ist es in beiden Fällen wesentlich, dass der direkt oder indirekt genutzte Strom möglichst klimaneutral bereitgestellt wird. Dafür steht in Deutschland in erster Linie die fluktuierende Stromerzeugung aus



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

**DBFZ**  
Martin Dotzauer  
martin.dotzauer@dbfz.de

**GFZ**  
Daniel Acksel  
daniel.acksel@gfz-potsdam.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Andreas Palzer  
andreas.palzer@ise.fraunhofer.de

**ISFH**  
Fabian Hüsing  
huesing@isfh.de

Matthias Littwin  
littwin@isfh.de

**IZES**  
Juri Horst  
horst@izes.de

**Wuppertal**  
Prof. Dr. Manfred Fischedick  
manfred.fischedick@wupperinst.org

Frank Merten  
frank.merten@wupperinst.org

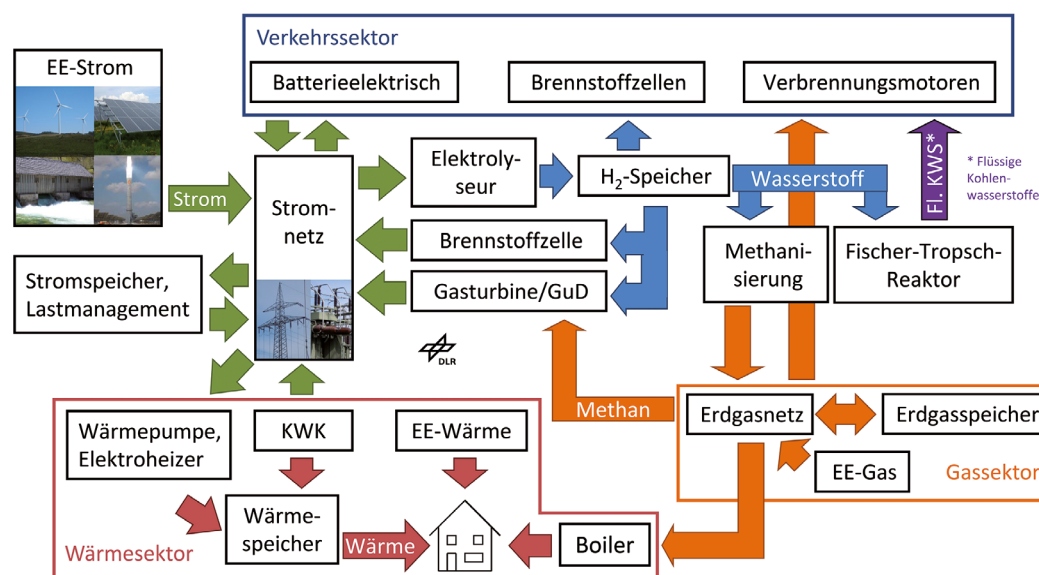


Abbildung 1  
Infrastrukturelle Verknüpfungen zwischen Strom-, Wärme-, Mobilitäts- und Gassektor

Photovoltaik (PV) und Windenergie zur Verfügung, die je nach Wetterlage, installierter Anlagenleistung und Nachfrage sowohl deutlich unter als auch deutlich über dem aktuellen Bedarf liegen kann.

Eine Deckung der resultierenden Defizite und Nutzung der Überschüsse kann auf verschiedene Weise erfolgen:

- durch die Verbindung über Stromnetze mit anderen Gebieten, in denen noch freie Erzeugungskapazität oder ungedeckter Bedarf vorliegen
- durch den Einsatz von Stromspeichern und regelbaren Kraftwerken
- durch eine Anpassung des Strombedarfs

Ein Lastmanagement kann dabei bei industriellen Großverbrauchern oder bei verschiedenen Technologien der Sektorenkopplung stattfinden. So weisen der Betrieb von Wärmepumpen und das Laden von Batteriefahrzeugen eine gewisse Flexibilität auf, die eine Anpassung an die aktuelle EE-Erzeugung prinzipiell ermöglicht. Darüber hinaus können auch Wasserstoffelektrolyseure mit einer gewissen Flexibilität betrieben und mit Speichern eine Entkopplung von Erzeugung und Bedarf ermöglicht werden. Eine Nutzung von Überschüssen kann auch durch eine (zusätzliche) elektrische Wärmeerzeugung in Wärmenetzen/-speichern und der Industrie erfolgen. Weitere Beiträge zur Deckung von Defiziten können durch Wärmespeicher flexibilisierte KWK-Anlagen, sowie die Rückverstromung synthetischer Brennstoffe leisten.

Die beschriebenen Ausgleichsoptionen zeichnen sich durch unterschiedliche Potenziale und Randbedingungen aus, die nicht nur durch technische Faktoren wie Gradienten, Kapazitäten, Verschiebedauern und Wirkungsgrade etc. sondern auch und ggf. viel stärker durch nicht-technische Faktoren wie Akzeptanz und Nutzerverhalten bestimmt werden.

### Wissenschaftliche Bewertung

Die wissenschaftliche Bewertung der technischen, wirtschaftlichen und realisierbaren Potenziale von Sektorenkopplung muss daher für die verfügbaren technologischen Optionen aus verschiedenen Perspektiven sowie für unterschiedliche zeitliche und räumliche Skalen erfolgen und erfordert demnach eine Vielzahl von Methoden. Mit Messungen, Feldtests und detaillierter Simulation können die Potenziale verschiedener Sektorenkopplungstechnologien auf Gebäude- und Quartiersebene bewertet werden. So kann beispielsweise der Betrieb elektrischer Heizsysteme und die Ladesteuerung von Batteriefahrzeugen in Kombination mit PV-Erzeugung und Wärmespeicherung untersucht werden.

Ergänzend zu solchen Analysen muss die Sektorenkopplung auch aus Gesamtsystemsicht untersucht werden. Um einen möglichst abgestimmten Zubau von Stromerzeugungs- und Sektorenkopplungstechnologien zu erreichen, ist zudem eine integrale Betrachtung des gesamten Transformationszeitraums vorteilhaft. Da das Stromnetz einerseits umfangreiche Möglichkeiten des Ausgleichs regionaler Erzeugungsdefizite und -überschüsse bietet, darin andererseits aber auch Einschränkungen unterliegt, muss die Wechselwirkung verschiedener Sektorenkopplungsoptionen in Deutschland auch unter Berücksichtigung der vorliegenden Netzbeschränkungen und Übertragungskapazitäten ins Ausland erfolgen. Die Anwendung kostenminimierender Ansätze mit stundengenauer Optimierung des Systembetriebs erlaubt sowohl die Identifikation günstiger Systemkonfigurationen als auch die Bewertung der vielfältigen Wechselwirkungen im gekoppelten Strom-, Wärme- und Verkehrssystem. Diese und analoge Systemanalysen sollten für mehrere Wetter- und Nachfragejahre durchgeführt werden, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Stromüberschüsse und -defizite und damit auf den Bedarf nach Ausgleichsoptionen und deren Einsatz haben [Vogt et al. 2016, Gils et al. 2016].

### Einsatzpotenziale

Die vorhandenen Untersuchungen zeigen, dass die heutigen und zukünftigen Einsatzpotenziale der Sektorenkopplungstechnologien stark von der Versorgungs-, Netz- und Bedarfsstruktur abhängig sind. Eine lokale Kopplung von Strom und Wärme auf Gebäudeebene ermöglicht durch die Verwertung von Erzeugerspitzen eine Erhöhung des Eigenverbrauchs dezentraler Erzeugung bei gleichzeitiger Senkung des Energiebezugs. Dafür sind jedoch Speicher, wie auch eine komplexe Regelung des dynamischen Betriebsverhaltens erforderlich [Hüsing et al. 2015, Littwin et al. 2016].

Zusammen mit der Kurzzeitspeicherung ist die Langzeitspeicherung von Wärme und Kälte ein zentrales energietechnisches Thema bei der EE-Integration in die Wärmeversorgung. Je nach Wärmenutzung, Untergrundbeschaffenheit und Platzverfügbarkeit kann eine saisonale Speicherung großer Wärmemengen wirtschaftlich und technologisch effizient entweder in oberirdischen Becken oder im Untergrund umgesetzt werden [Kranz 2013]. Hinsichtlich der Untergrundwärmespeicherung, z. B. in Aquiferen (ATES) besteht interdisziplinärer Forschungsbedarf in der Geologie, Biologie, Materialkunde, Verfahrenstechnik sowie in der Systemintegration [Kranz 2015, Tugores 2015].

Verschiedene modellgestützte Szenariostudien des gesamten Versorgungssystems unterstreichen, dass sich eine stärkere Verzahnung von Strom-, Wärme- und Verkehrssektor mittel- bis langfristig als volkswirtschaftlich vorteilhaft erweist [Henning et al. 2013, Scholz et al. 2014, Henning et al. 2015]. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Stromerzeugung kann durch Elektrifizierung und synthetische Kraftstoffe zudem eine weitgehende Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Sektoren erreicht werden. Ein hoher Anteil an Batteriefahrzeugen mit Ladesteuerung, eine erhöhte Gebäudesanierungsrate und ein beschleunigter Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung sind wirkungsvolle Maßnahmen zur Begrenzung des Bedarfs an zusätzlichen EE-Anlagen [Palzer 2016].

### Flexible Wärmeerzeugung

Eine Flexibilisierung des Wärmepumpenbetriebs ermöglicht es, den Bedarf nach gesicherter Erzeugungsleistung zu begrenzen. Legt man z. B. gemäß [Nitsch et al. 2012] einen Versorgungsanteil von etwa 16% des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs von Kleinverbrauchern im Jahr 2050 zu Grunde, so beläuft sich diese auf etwa 4 GW. Ähnlich große Effekte lassen sich durch ein gesteuertes Laden von Batteriefahrzeugen erreichen. In Zielszenarien für das Jahr 2050 können EE-Abregelungen um 4-6 TWh/a und residuale Spitzenlasten um etwa 3,5-4,5 GW gesenkt werden [Pregger et al. 2012].

Eine Umstellung der KWK von einem wärmegeführten auf einen stromgeführten Betrieb – ermöglicht durch konventionelle Spitzenlastkessel und thermische Speicher – erweist sich als wirkungsvolle Maßnahme zur Begünstigung der EE-Integration. Zum einen könnten bereits heute stromgeführte BHKW in nennenswertem Umfang (gut 7%) und künftig zwischen 40-50% (2020-2030) zur Minutenreserve beitragen [Merten et al. 2014]. Zum anderen könnten durch ein Herunterregeln der KWK in Zeiten hoher EE-Einspeisung im Jahr 2050 bis zu 10 TWh an EE-Abregelung vermieden werden. Auch eine Investition in elektrische Heizalternativen in KWK-Systemen erweist sich als wirtschaftlich und ermöglicht die Nutzung von bis zu weiteren 10 TWh von ansonsten abgeregeltem EE-Strom. Eine Flexibilisierung der Wärmenetzversorgung erweist sich vor allem in Szenarien und Regionen mit hohem Winderzeugungsanteil als wirtschaftlich [Gils 2015].

Eine synthetische Erzeugung von Wasserstoff, sowie anderen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen zur Nutzung im Verkehrssektor, aber auch zur Wärmeversorgung, und Rückverstromung geht einher mit einem steigenden Strombedarf, der bei heimischer

Erzeugung von zusätzlichen Wind- und PV-Anlagen bereitgestellt werden müsste. Folglich müsste zumindest die erste Stufe der Erzeugungsrouten – die Wasserstoffelektrolyse – für einen möglichst flexiblen Betrieb ausgelegt sein. Unter Annahme einer Auslegung auf 3000 jährliche Volllaststunden und der Verfügbarkeit eines 12-Stunden-Speichers kann die in Zielszenarien für das Jahr 2050 resultierende zusätzliche EE-Stromerzeugung nahezu vollständig von den Elektrolyseuren aufgenommen werden [Gils 2015].

Die Ergebnisse verschiedener Studien zeigen zudem eine wesentliche Rolle des Netzausbaus bei der EE-Integration, vor allem in Szenarien mit hoher Windkraftnutzung. Eine Stärkung des Netzes erlaubt eine deutlich höhere Nutzung der Flexibilitätspotenziale von Wärmepumpen, Batteriefahrzeugen und Wasserstoffelektrolyseuren, sowie weiteren Lastmanagements.

### Synthetische Brennstoffe

Aus heutiger Sicht sind synthetische Brennstoffe nicht konkurrenzfähig mit konventionellen Brennstoffen. Dies ergibt sich aus den hohen Kosten und Wandlungsverlusten der Konversionsanlagen. Um längerfristig eine Dekarbonisierung des Straßengüter-, Luft- und Schiffsverkehrs zu realisieren, ist eine Nutzung synthetischer Kraftstoffe jedoch unabdingbar – es sei denn, es werden völlig neue Infrastrukturen (Oberleitungs-LKW) bzw. Mobilitätskonzepte (luftgestützter Individualverkehr) realisiert. Um die Wandlungsverluste niedrig zu halten, ist dabei eine direkte Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen zu bevorzugen. Die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit hängt von den Lernkurven der Konversionsanlagen, der Preisentwicklung fossiler Brennstoffe und der Weiterentwicklung klimapolitischer Regulierungsmaßnahmen, wie z. B. dem CO<sub>2</sub>-Emissionshandel, ab.

Für die Bereitstellung gesicherter Erzeugungsleistung bietet sich eine Rückverstromung synthetischer Brennstoffe an. Diese ist zum heutigen Zeitpunkt jedoch bei weitem teurer und ineffizienter als die alternativen Speichertechnologien, die Stärkung des transeuropäischen Stromnetzes oder die Nutzung fossilen Erdgases. Dies ändert sich erst bei sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, bei denen die Rückverstromung von Wasserstoff und/oder Methan zur Überbrückung längerer Windflauten dient. Ein Vorteil der Nutzung von Methan anstatt von Wasserstoff liegt dabei in der Möglichkeit der Nutzung bestehender Infrastrukturen, vor allem des Erdgasnetzes, die jedoch einhergeht mit einem weiteren Umwandlungsschritt und folglich höheren Energieverlusten.

Entscheidungen über die zukünftige Weiterentwicklung des Energiesystems müssen sich nicht nur auf

technische und ökonomische Bewertungen stützen, sondern auch die Akzeptanz der Nutzer und der Bevölkerung im Allgemeinen in Betracht ziehen. Eine hohe Akzeptanz wirkt sich messbar positiv auf die Verbreitung und Anwendung neuer Technologien aus.

### Fazit

Auf Grundlage der vielfältigen existierenden Studien lässt sich schlussfolgern, dass eine verbesserte Sektorenkopplung umfangreiche Kostensenkungspotenziale für zukünftige, klimafreundliche Energieversorgungssysteme bietet. Voraussetzung dafür ist die Vermeidung von Pfadabhängigkeiten, die zu Lock-In-Effekten und verlorenen Investitionen führen können. Einsparungen resultieren einerseits aus der umfassenderen Nutzung der Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen, und andererseits aus der Senkung des Bedarfs nach Reservekraftwerken. Wesentlich für die positiven Effekte der Sektorenkopplung ist, dass die Technologien an den Schnittstellen – insbesondere Wärmepumpen, Batteriefahrzeuge, Elektrolyseure, KWK-Anlagen – möglichst flexibel betrieben werden können. Dafür ist die Nutzung von Wärme- und Wasserstoffspeichern, sowie die Ladesteuerung von Batteriefahrzeugen essentiell. Im gegenteiligen Fall eines unflexiblen Ausbaus dieser Technologien übersteigen die zusätzlichen Kosten im Stromsystem für Speicher, Netze und regelbare Erzeugung, die bei einer flexiblen Sektorenkopplung anfallenden Kosten. Folglich muss der Flexibilität eine hohe Priorität beim Ausbau der Sektorenkopplungstechnologien eingeräumt werden.

Obwohl der EE-Versorgungsanteil im Stromsektor in 2015 erst bei etwa einem Drittel lag, wurden bereits signifikante Mengen der potenziellen EE-Erzeugung aufgrund von Netzengpässen abgeregelt. Um diese Abregelung kurzfristig zu reduzieren, muss der Schwerpunkt zunächst auf einem beschleunigten und zielgerichteten Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze, sowie der Flexibilisierung der konventionellen Erzeugungskapazitäten liegen. Auch intelligente Steuerungskonzepte von flexiblen Lasten können hier einen Beitrag leisten. Eine erhöhte Flexibilität besonders von Kohlekraftwerken und KWK-Anlagen muss einerseits technisch ermöglicht, und andererseits regulatorisch angereizt werden. Maßnahmen zur Vermeidung lokalen „Überschusstroms“ sollten einen klaren Vorrang gegenüber solchen zur Förderung von dessen Nutzung haben.

### Referenzen

- Gils, H.C.: Balancing of intermittent renewable power generation by demand response and thermal energy storage, Dissertation, Universität Stuttgart, 2015
- Gils H.C., Bothor S., Cao, K.-K., et al. Szenarien der Versorgungssicherheit in Deutschland und Süddeutschland, Projektbericht für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2016
- Henning, H.-M.; Palzer, A.: Energiesystem Deutschland 2050. Eigenveröffentlichung Fraunhofer ISE, November 2013
- Henning, H.-M.; Palzer, A.: Was kostet die Energiewende? Eigenveröffentlichung Fraunhofer ISE, November 2015
- Horst, J. et. al. Versorgungssicherheit auf dem Weg zu 60% Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch: eine aktorsbezogene Analyse, ein Projekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016
- Horst, J., Tänzer G., Klann, U., et al. EMob.-RLP: Elektromobilität in Energieversorgungsnetzen und dezentralen Energiemanagementsystemen, erstellt im Rahmen des Netzwerks Elektromobilität Rheinland-Pfalz 2013
- Hüsing, F., Glembin J., Rockendorf, G. Potenziale thermischer Nutzung photovoltaischer Energie, 25. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2015
- Kranz, S., Frick, S.: Efficient cooling energy supply with aquifer thermal energy storages. Applied Energy 109, 321-327, 2013
- Kranz, S., Blöcher, G., Saadat, A. Improving Aquifer Thermal Energy Storage Efficiency, World Geothermal Congress, 2015
- Littwin, M., Ohrdes, T., Knoop M., et al. Messtechnische Evaluation einer modernen Strom-Wärme Systemlösung in einem bewohnten Passivhaus, In: Wenzl, H., Kaiser, F. (Hrsg.): Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN, Goslar, 14. und 15. Juni 2016. 1. Auflage, Göttingen, Cuvillier Verlag Göttingen, 2016
- Merten, F., Krüger, C., Nebel, A., et al. Klimapolitischer Beitrag kohlenstoffarmer Energieträger in der dezentralen Stromerzeugung sowie ihre Integration als Beitrag zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungssysteme, Projektbericht für das Umweltbundesamt, 2014
- Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., et al. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Projektbericht für das BMU, 2012.

- Palzer, A.: Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2016
- Pregger, T., Luca de Tena, D., O'Sullivan, M., et al. Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen, Projektbericht für das BMWi, 2012
- Scholz, Y., Gils, H.C., Pregger, T., et al. Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender Stromerzeugung, Projektbericht für das BMWi, 2014
- Tugores, C. R., Francke, H., Cudok, F., et al. Coupled modeling of a district heating system with aquifer thermal energy storage and absorption heat transformer, 11<sup>th</sup> International Modelica Conference, 2015
- Vogt, T., Bremen, L. v., Buddeke, M., et al. RESTORE 2050 – Regenerative Stromversorgung & Speicherbedarf im Jahr 2050, Projektabschlussbericht: Ergebnisse und Handlungsempfehlungen, Projektbericht für das BMWi, 2016