

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

IFEU - INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

STIFTUNG UMWELTENERGIERECHT

# INTERAKTION EE-STROM, WÄRME UND VERKEHR

Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung

Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# INTERAKTION EE-STROM, WÄRME UND VERKEHR

## Kurzfassung

**Norman Gerhardt (Projektleiter, Fraunhofer IWES)**

**Fabian Sandau, Angela Scholz, Dr. Henning Hahn (Fraunhofer IWES)**

**Patrick Schumacher, Christina Sager (Fraunhofer IBP)**

**Fabian Bergk, Claudia Kämpfer, Wolfram Knörr, Jan Kräck, Udo Lambrecht (IFEU)**

**Oliver Antoni, Johannes Hilpert, Katharina Merkel, Thorsten Müller (Stiftung Umweltenergierecht)**

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES)  
Institutsteil Kassel (Koordinator)

Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
Förderkennzeichen: 0325444A, 0325444B, 0325444C  
Querschnittsforschung erneuerbare Energien

Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Fraunhofer IBP)  
Standort Kassel

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung  
Heidelberg

Stiftung Umweltenergierecht  
Würzburg

September 2015

## Kurzfassung

### Einführung

Für die Erreichbarkeit der Klimaschutzziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 stellen Windenergie und Photovoltaik die tragenden Säulen dar. Diese sind relativ kostengünstig, haben ein hohes technisches Ausbaupotenzial und können neben der Deckung des Strombedarfs auch zu einem hohen Teil den Energiebedarf im Wärme- und Verkehrssektor decken.

Im Projekt wurde untersucht, wie das Zusammenspiel zwischen dem Stromsektor und dem Wärme- und Verkehrssektor, im Sinne einer übergreifenden Klimaschutzstrategie, ausgestaltet werden muss. Es wurde dazu ermittelt, wie hoch der Strombedarf in einem kostenoptimierten sektorenübergreifenden Zielszenario wäre, wenn eine THG-Emissionsreduktion - bezogen auf alle Sektoren - um 80% (im Jahr 2050 gegenüber 1990) erreicht werden soll. Die damit verbundenen Herausforderungen hinsichtlich der zeitlichen Vereinbarkeit von fluktuierendem Stromangebot und der Stromnachfrage sowie Rückkopplungen zwischen den Sektoren wurden unter dem Einbezug von Speicher- und Übertragungsmöglichkeiten analysiert und mögliche Synergien identifiziert.

Um die Synergien der Sektorkopplung zu nutzen werden Roadmaps für die Sektoren Wärme (Gebäude- und Industrieprozesswärme) und Verkehr entwickelt, die ein kostenoptimiertes Zielszenario möglich machen. Es werden Vorschläge in allen Sektoren gemacht, um die notwendigen Schlüsseltechnologien einzuführen und damit die Roadmap umzusetzen.

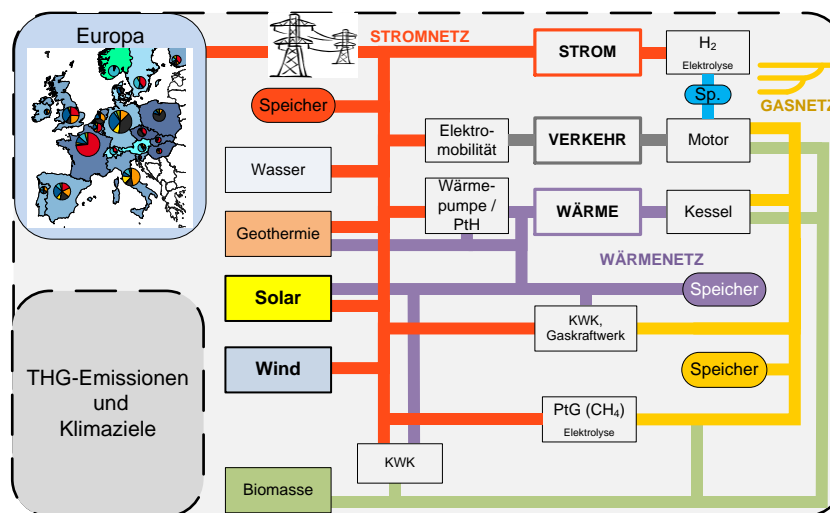


Abbildung 0-1:  
Interaktion und  
Sektorkopplung

Quelle: angelehnt an [Sternier, M. 2009]

### Kostenoptimale Ausgestaltung eines Energieversorgungssystems für das Jahr 2050

Mit einem sektorenübergreifenden Zubauoptimierungsmodell wurde ein Energieversorgungssystem für das Jahr 2050 bestimmt, bei dem die Kosten (Betriebskosten, Investitionen inkl. Infrastruktur) in Summe über den Strom-, Wärme- und Verkehrssektor minimal sind. Mögliche Entwicklungsoptionen von wichtigen Eingangsgrößen wurden dabei vorab im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen analysiert und bewertet (Gebäudedämmung, Biomassekonversion, verschiedene Verkehrsinfrastruktur und Technologioptionen im Bereich Pkw und Lkw).

Neben den THG-Minderungsanforderungen für Deutschland (-80% gegenüber 1990, alle Sektoren inkl. internationaler Verkehr) wurde auch für Europa ein THG-Minderungsziel von 80% unterstellt (Ziel der EU). Dies führt – aufgrund des gegenwärtigen Flugverkehrsanstieg und des notwendigen Lastenausgleichs zwischen den Ländern – zu einem ambitionierteren Ziel für Deutschland von – 30 % gegenüber dem nationalen Kyoto-Protokoll (bzw. -86% statt -80% THG-Minderung).

Zudem wird unterstellt, dass vor dem Hintergrund des prognostizierten globalen Bevölkerungswachstums und sich dadurch verschärfen Nutzungskonkurrenzen, Biomasse, insbesondere Energiepflanzen, nur restriktiv für energetische Zwecke genutzt werden (keine Importe, kein Ausbau der bestehenden Anbaufläche von ca. 2 Mio. ha.) Alle folgenden Ergebnisse beziehen sich auf dieses kostenoptimale Energieversorgungssystem des Jahres 2050.

### Ergebnisse – Stromerzeugung und –verbrauch im Jahr 2050

Unter den vorgegebenen Randbedingungen - bei denen vor allem mittels Wind- und Solarenergie auch die Nachfragen im Wärme- und Verkehrssektor weitestgehend klimaneutral erzeugt werden - resultiert ein jährlicher Strombedarf von 793 TWh/a (netto, inkl. Netz- und Speicherverluste) in Deutschland (gegenüber ca. 540 TWh/a für 2014).

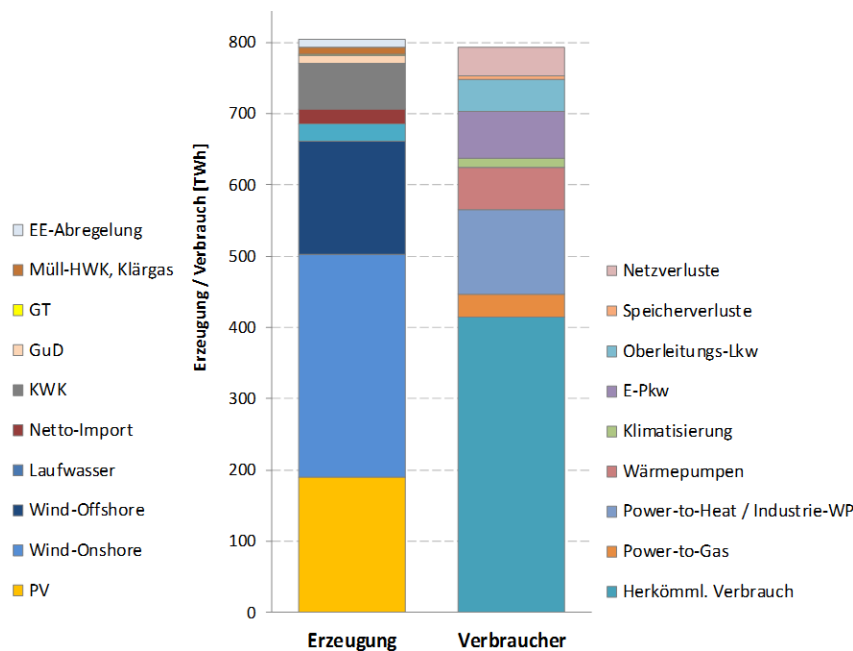


Abbildung 0-2:  
Energiebilanz Deutschland  
2050

Hierbei werden die Effizienzpotenziale zur Verbrauchsreduktion bei heute bestehenden Stromanwendungen (herkömmnl. Verbrauch) umgesetzt – der Strombedarf geht hier von 538 TWh/a auf 415 TWh/a zurück. Andererseits kommt es zu einem hohen Zuwachs an neuen stromnutzenden Anwendungen (siehe Abbildung 0-2).

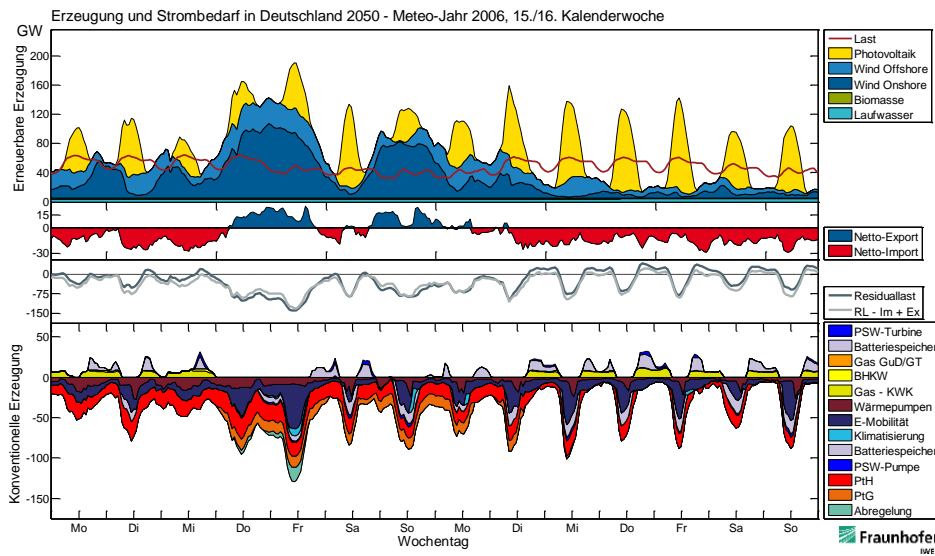
- Schlüsseltechnologien sind im **Wärmebereich** Wärmepumpen (dezentral, sowie Großwärmepumpen in Wärmenetzen und Industrie), Elektrodenkessel im Bereich Fernwärme und Industrie. Dies führt zu einer Steigerung des Stromeinsatzes im Wärmebereich von heute 90 TWh/a auf 222 TWh/a im Jahr 2050.
- Im **Verkehrsbereich** sind die Schlüsseltechnologien vollelektrische Pkw (BEV), Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) in Kombination mit Erdgas und der Oberleitungs-Lkw. Dies führt zu einer Steigerung von heute 17 TWh/a auf 131 TWh/a im Jahr 2050. Übergreifend wird Power-to-Gas in Höhe von 31 TWh/a eingesetzt.

Um diese Nachfrage zu decken, ist eine sehr hohe fluktuierende EE-Einspeisung notwendig. Die Ergebnisse aus der Zubauoptimierung zeigen, dass ein sehr hoher Leistungsanteil von Photovoltaik (200 GW PV) wirtschaftlich ist. Diese übertrifft im Basisszenario die Leistung von Windenergie (140 GW Wind-Onshore, 38 GW Wind-Offshore). Die wetterbedingt starken Schwankungen unterworfenen EE-Stromerzeugung

kann auch bei stündlicher Betrachtung vom Gesamtenergiesystem effizient verwendet werden (siehe Abbildung 0-3):

- Insbesondere neue Stromverbraucher weisen eine hohe Flexibilität auf um temporär kostengünstigen Strom aufzunehmen.
- Zudem bietet der europäische Strommarkt ein hohes meteorologisches Ausgleichspotenzial.

In Summe ist die berechnete Abregelung mit 2% der maximal möglichen Stromeinspeisung aus fluktuierender EE-Erzeugung gering.

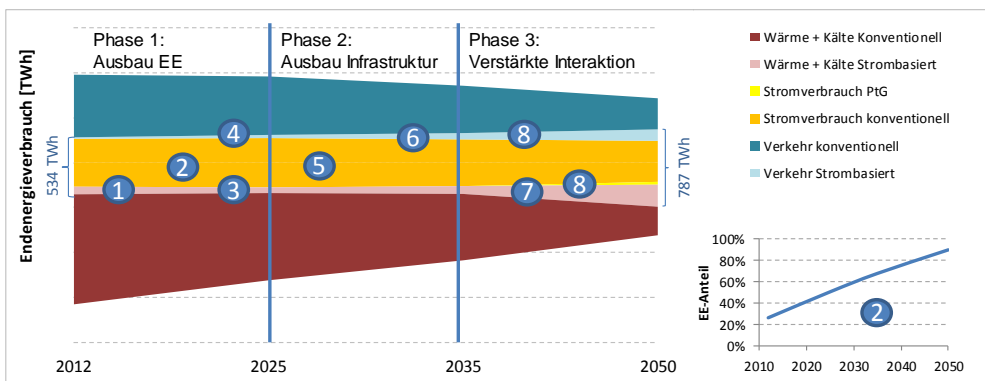


**Abbildung 0-3:**  
Angebots- und Nachfragecharakteristik 2-Beispielwochen DE 2050

**Rückschlüsse aus dem langfristigen Zielszenario für die Entwicklung Heute bis 2050**

Um die langfristigen Klimaziele zu erreichen ist es erforderlich, Maßnahmen zur Etablierung der vorgeschlagenen Schlüsseltechnologien in die Wege zu leiten. Die Entwicklung bis 2050 kann grob in 3 Phasen geteilt werden:

- Phase 1: Einen weiteren Technologieausbau,
- Phase 2: Die Etablierung einer langfristigen Infrastruktur für Flexibilität, Versorgungssicherheit und Netze
- und Phase 3: im Zuge des zunehmenden „EE-Überschussstroms“ eine beschleunigte Interaktion der Sektoren.



**Abbildung 0-4:**  
Roadmap des Gesamtsystems

Entsprechend der zeitlichen Entwicklungen in den Sektoren und in Rückkopplung mit dem Strommarkt ergeben sich folgende auch in Abbildung 0-4 zeitlich eingeordnete Handlungsempfehlungen:

- PtH (Elektrodenkessel) müssen frühzeitig für Systemdienstleistungen eingesetzt werden [1].

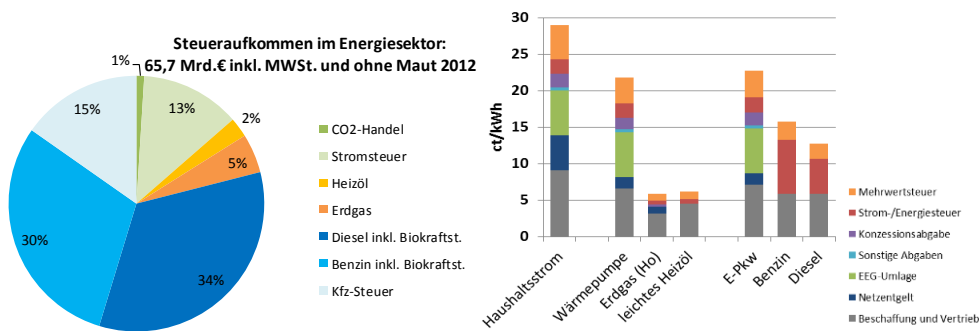
- Es bedarf eines verstärkten Ausbaus der erneuerbaren Energien, um einen hohen EE-Anteil im Stromsektor und zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage zu erreichen [2].
- Frühzeitig bedarf es eines kontinuierlichen Ausbaus von Wärmepumpen [3] und der Elektromobilität [4], für die entsprechende marktseitige Maßnahmen erforderlich sind.
- Mittelfristig müssen neue Kraftwerke zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit gebaut werden mit einer Fokussierung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) [5].
- Für Elektro-Pkws bedarf es eines weiteren Ausbaus der öffentlichen Ladeinfrastruktur zur Erhöhung der Flexibilität des Fahrstrombezugs am Tag [6].
- Langfristig gewinnt die Stromerzeugung für den Wärmesektor und zur EE-Überschussverwertung durch PtH stark an Bedeutung [7].
- Auch für den Verkehrssektor bedarf es eines zusätzlichen EE-Ausbaus und eine weitere EE-Überschussverwertung erfolgt durch PtG [8].

### Rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Rahmen

Entscheidend für die Marktentwicklung der neuen Stromverbraucher ist die Wettbewerbssituation zu fossilen Referenztechnologien und damit zu den Energiekosten.

Strom weist heute eine deutlich höhere Kostenbelastung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen auf. Dies ist darin begründet, dass die derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen zu einer fast vollständigen Belastung der Strombezugskosten für strombasierte Wärme- und Verkehrstechnologien mit allen staatlich induzierten Stromkostenbestandteilen, wie EEG-Umlage, Netzentgelte, Stromsteuer etc., führen. Diese Wettbewerbsnachteile werden durch bestehende staatliche Förderungen und Privilegierungen in ordnungsrechtlichen Vorschriften nicht ausgeglichen.

Dabei ist der Unterschied zwischen Strom und Wärme noch stärker ausgeprägt als zwischen Strom und Verkehr. Der Verkehrssektor trägt derzeit zu ca. 80% des energiebedingten Steueraufkommens inkl. Kfz-Steuer bei. Durch die klimapolitisch notwendige Vermeidung fossiler Brennstoffe würde es ohne Anpassungen zu einbrechenden Steuereinnahmen des Staates kommen.



**Abbildung 0-5:** Status Quo Staatseinnahmen im Energiebereich 2012 und Endverbraucherpreise Haushalte 2015

Ziel muss es sein, insbesondere durch Steuererhöhungen für fossile Brennstoffe die Wettbewerbssituation für neue Stromverbraucher zu verbessern und gleichzeitig das Steueraufkommen zu stabilisieren und dabei die industrie- und sozialpolitische Verträglichkeit zu berücksichtigen. Dies könnte durch Einführung einer verfassungskonform ausgestalteten sektorübergreifenden CO<sub>2</sub>-Abgabe für fossile Brennstoffe einerseits und einer Absenkung der Stromsteuer andererseits geändert werden. Ferner könnten strombasierte Anwendungen von einzelnen staatlich induzierten Stromkostenbestandteilen befreit werden.

## Roadmap Wärme und Kernaussagen

Für die Transformation des Wärmesektors hin zu einer weitgehend klimaneutralen Wärmeversorgung ergeben sich aus dem Projekt eine Vielzahl von Konsequenzen und Erkenntnissen, die im Folgenden in der Form von Kernthesen zusammengefasst sind.

Grundsätzliche und Allgemeine Schlussfolgerungen sind:

Zur sektorübergreifenden Erreichung der Klimaziele spielt Effizienz im Wärmesektor eine zentrale Rolle. Die energetische Sanierung reduziert nicht nur den Wärmebedarf, sondern auch den Zubau weiterer benötigter EE-Anlagen im Stromsektor. Dies ermöglicht es Biomasse für Anwendungsbereiche zur Deckung des Energiebedarfs zu verwenden, für die es keine/ nur wenig EE-Alternativen gibt.

*Hohe Bedeutung der energetischen Sanierung*

Die dezentrale und zentrale Wärmepumpe (WP) für Haushalte, Gewerbe, in der Fernwärme sowie in der Industrie ist die Schlüsseltechnologie zur effizienten Erhöhung des EE-Anteils im Wärmesektor. Der Anteil der Wärmepumpen sollte kontinuierlich gesteigert werden.

Durch die Schlüsseltechnologie Elektrokessel (PtH) in Industrie und Fernwärme werden erst langfristig bei sehr hohem EE-Stromanteil hohe Anteile am Wärmemarkt erschlossen.

Für die Marktdurchsetzung der elektrischen Wärmepumpen und PtH ist es empfehlenswert einerseits von Stromkostenbestandteilen befreit werden und zum anderen staatlich stärker gefördert werden.

*Strom wird Hauptenergieträger im Wärmesektor*

Biomasse in Form von Pellets, Holzhackschnitzel- und Scheitholz sind insbesondere fokussiert in ineffizienten Bestandsgebäuden (hoher Wärmebedarf, geringe Effizienz für WP) energetisch sinnvoll und in Siedlungen mit geringer Wärmedichte (ländliche Umgebung/Stadtrand). Neben schwer sanierbaren Gebäuden sollte die Biomasse in der Industrie mit Wärmebedarfen bei hohen Prozesstemperaturen, bei denen die elektrische WP keinen Einsatz mehr hat, eingesetzt werden (Abbildung 0-7 / Abbildung 0-7 → [1]).

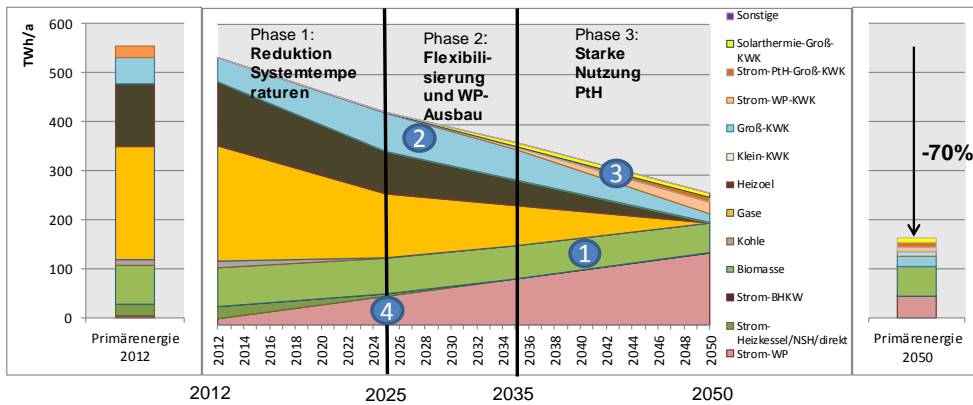
*Fokussierte Verwendung Biomasse*

Flexibilität steht im Fokus. KWK+PtH oder Heizkessel+PtH erhöhen kurz- und mittelfristig die Flexibilität für das Stromversorgungssystem. Diese bivalenten Systeme können je nach Stromangebot (EE-Überschuss dann Stromnutzung oder EE-Deckungslücke dann Gasnutzung) flexibel auf die Erfordernisse des Strommarktes reagieren und die Effizienz des Gesamtsystems steigern [3].

Langfristig können hohe elektrische EE-Anteile durch bivalente Systeme in den Wärmemarkt integriert werden.

*Flexibilität bivalenter Hybridsysteme*

Im **Haushaltsbereich** stellt sich die Transformation des Energiesystems im Bereich der verschiedenen Brennstoffnutzungen und Technologien wie folgt dar:



Kurzfassung

Abbildung 0-6:  
Roadmap Wärmebedarf  
Haushalte

Für diese Transformation sind insbesondere Fragen zu Fernwärme und Wärmepumpen in Bestandgebäuden hervorzuheben.

Der Anteil der Fern- und Nahwärme steigt langfristig von derzeit ca. 12% auf ca. 25% am Wärmemarkt im Jahr 2050. Insbesondere in Städten mit hoher Bebauungsdichte bzw. vielen Wärmesenken spielt die Fernwärme eine entscheidende Rolle (Abbildung 0-7 -> [2]).

Zu empfehlen ist eine Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Fern- und Nahwärme insbesondere im KWKG.

*Ausbaus der Fern- und Nahwärme, Ausbau/Fokussierung Industrie-KWK-Systeme*

Die Fernwärme durchlebt bis 2050 eine Transformation. Hochtemperaturnetze auf Basis von Gas/Kohle müssen zu Wärmenetzen mit Gas-KWK, Groß-Wärmepumpen und Solarthermie+PtH entwickelt werden [3].

Eine weitere Temperaturabsenkung der Wärmenetze ist für den Einsatz von Solarthermie und Groß-Wärmepumpen unabdingbar. Niedertemperaturnetze und kalte Fernwärme sind auszubauen und neu zu entwickeln [2].

Jegliche Abwärme (Gewerbe, Abwasser, Rechenzentren etc.) sind für Großwärmepumpen nötig. Großflächen-Solarthermieranlagen in Fern- und Nahwärmenetzen reduzieren die spezifischen Kosten für Solarthermie erheblich.

*Transformation Fernwärme*

Effizienz bei der Strom-Umwandlung hat hohen Stellenwert zur Reduktion des EE-Zubaus im Stromsektor.

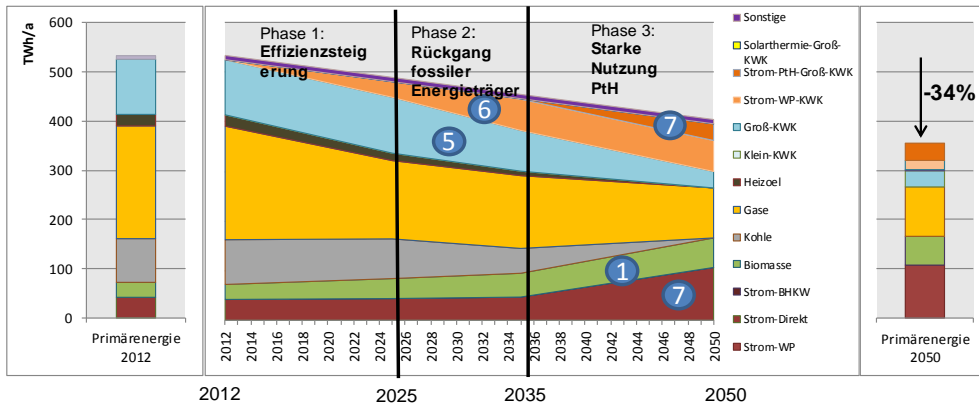
Die Analyse zeigt, auf Grund der hohen Effizienz, dass Sole-Wärmepumpen sich am stärksten durchsetzen. Diese sollten in Kopplung mit Niedertemperatur- bzw. Flächenheizungen priorisiert gefördert werden. Insbesondere sollte der Anteil von Wärmepumpen im Gebäudebestand erhöht werden [4].

Die Ergebnisse zeigen auf, dass eine Anhebung der Fördersätze für Sole-Wärmepumpen im MAP und im KfW Programm in Kopplung mit Niedertemperaturheizungen zu empfehlen ist.

*Effiziente Wärmepumpen im Gebäudebestand*



Weiter spielen KWK und Elektrodenkessel auch im **Industriebereich** eine große Rolle



**Abbildung 0-7:**  
Roadmap Wärmebedarf Industrie

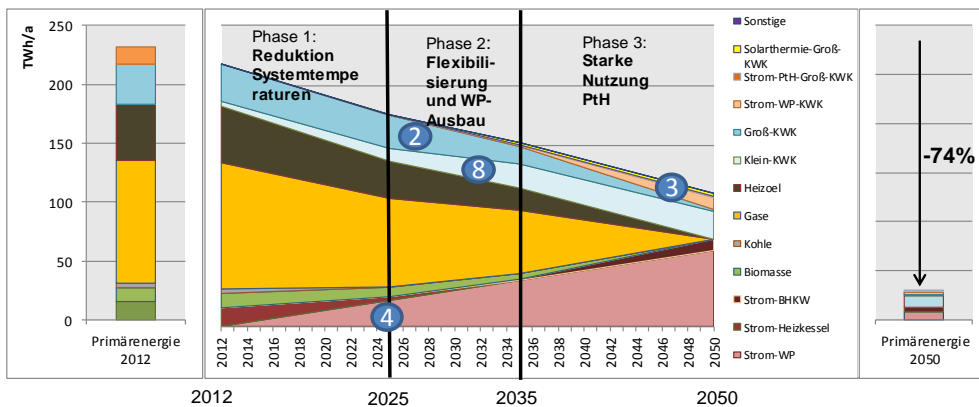
Im Industriebereich bleibt der Anteil von KWK-Systemen von heute ca. 27% an der Wärmeerzeugung relativ konstant, jedoch mit einer Fokussierung auf Dampfananwendungen. (Abbildung 0-7 → [5])

KWK-Anlagen sollten flexibler und ausgebaut werden und werden, künftig mit geringen Vollaststunden betrieben. Dabei spielen Groß-KWK Anlagen der Fernwärme und Industrie im Temperaturbereich größer 100° und kleiner 500°C eine wichtige Rolle.

Groß-WP werden bereits mittelfristig für eine effiziente Stromnutzung wichtig [6]. PtH spielt längerfristig eine wichtige Rolle um große EE-Überschüsse effizient in der Industrie nutzen zu können [7].

*Ausbau und Flexibilisierung von KWK-Anlagen und PtH*

Der **Gewerbebereich** ist im Vergleich zum Haushaltsbereich durch einen hohen Neubaugrad, dem Einsatz von dezentralen KWK-Anlagen und dem Klimatisierungsbedarf im GHD Sektor gekennzeichnet.



**Abbildung 0-8:**  
Roadmap Wärmebedarf Gewerbe

Eine Flexibilisierung im Wärmemarkt durch Wärmespeicher, neue Regelverfahren für Kompressionskälteanlagen, Wärmepumpen und KWK-Anlagen ist für eine erhöhte Integration von fluktuierender Erzeugung notwendig. Gebäude selbst und deren Komponenten sind als Kurzzeitspeicher (Stunden bis mehrere Tage) gut geeignet. Warmwasserspeicher und Heizungspufferspeicher als Tages- bis Wochenspeicher nutzbar.

Klein-KWK als kostengünstiger Motor mit einer hohen Leistungsauslegung in Kombination mit PtH und Wärmespeicher im Gewerbebereich erfüllt am effizientesten die Anforderungen in diesem Sektor. (Abbildung 0-8 → [8])

Die bestehenden Fördermöglichkeiten für thermische Speicher im KWKG sollten ausgebaut werden.

Stationäre Brennstoffzellen (als KWK) sind nach bisherigen Analysen auch langfristig gegenüber motorbasierten KWK-Anlagen nicht wirtschaftlich.

Gas-Wärmepumpen konkurrieren in effizienten Gebäuden mit elektrischen Wärmepumpen und in ineffizienten Gebäuden mit Brennwertkesseln und setzen sich bei den dargestellten Randbedingungen im System nicht durch.

#### Weiterführende Handlungsempfehlungen sind:

Um das Flexibilitäts-Potenzial zu heben, sind regulatorische Maßnahmen wie die Einführung dynamischer Umlagen (z.B. EEG) auch für dezentrale flexible Verbraucher wie Wärmepumpen zu empfehlen. Zusätzlich kann dadurch technologieoffen die effiziente Verwendung von EE-Strom ermöglicht und sektorenübergreifend die Markteffizienz erhöht werden.

Eine verfassungskonforme Ausgestaltung der dynamischen EEG-Umlage ist möglich.

Die Berechnungen für den Neubau und die Bestandsgebäude zeigen eine hohe Preisdifferenz zwischen Gas und Strom als größtes Hemmnis für die Erreichung der Ziele der Energiewende im Wärmemarkt. Eine stabile Förderung des Absatzmarktes für dezentrale und zentrale Wärmepumpen ist notwendig. Als Maßnahme kann als erster Schritt eine aufkommensneutrale Umschichtung der Stromsteuer bei Anhebung der Energiesteuer für Heizöl und –gas in Betracht gezogen werden.

Bei Änderungen der Stromsteuer sind die europarechtlichen Vorgaben der Richtlinie 2003/96/EG zu beachten, die Mindeststeuersätze für Strom – bei allerdings weitgehenden Ausnahmemöglichkeiten – vorschreibt.

Im kostenoptimalen Klimaschutzszenario entstehen hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von ca. 180 €/t. Eine zumindest anteilige Bepreisung in Form einer CO<sub>2</sub>-Steuer / CO<sub>2</sub>-Abgabe bzw. CO<sub>2</sub>-bezogenen Energiebesteuerung für fossile Energieträger (Erdgas / Erdöl) ist zu empfehlen. Die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe ist verfassungsrechtlich als Modifikation einer bestehenden Steuer generell nach Ansicht der Autoren zulässig.

Als weiterer Schritt sollte der konsequente Einsatz von regenerativen Energieträgern (ohne Biomasse) im Neubausektor in Betracht gezogen werden.

Das EEWärmeG verpflichtet entsprechend Bauherren, technologieoffen eine bestimmte Menge erneuerbarer Energien zur Wärmeversorgung des Gebäudes einzusetzen. Aber auch ein Verbot von fossilen, dezentralen Heizkesseln im Neubau dürfte aus Gründen des Klimaschutzes verfassungsrechtlich zu rechtfertigen sein.

### Roadmap Verkehr und Kernaussagen des Projektes

Für die Transformation des Verkehrssektors hin zu einer weitgehend klimaneutralen Energieversorgung ergeben sich aus den Analysen eine Vielzahl von Erkenntnissen, die im Folgenden in der Form von Kernaussagen zusammengefasst sind.

Das **Zusammenspiel der Sektoren** betreffend:

Um Synergien bei der Energieerzeugung, der Speicherung und Nutzung der Energie zu optimieren, müssen im Sinne einer möglichst kostenminimalen und ressourceneffizienten Erreichung der Klimaziele alle Sektoren gemeinsam betrachtet werden. Der Verkehrssektor kann dabei einen wesentlichen Beitrag zur Integration fluktuierender EE-Stromes leisten, benötigt aber als neuer Verbraucher erneuerbarer Energien auch zusätzlich für den Verkehr gebaute EE-Erzeuger.

Der Verkehrssektor muss erhebliche Anstrengungen zur THG- und Endenergieverbrauchsreduktion leisten.

Aus der sektorübergreifenden Betrachtung der Treibhausgasemissionen lässt sich der Beitrag ableiten, den der Verkehr zum Erreichen des nationalen Klimaschutzzieles zu leisten hat. In dem kostenoptimalen Szenario emittiert der nationale Verkehr im Jahr 2050 noch 50,8 Mio. t CO<sub>2</sub>eq. Dies entspricht einer Minderung der Emissionen im Verkehrssektor gegenüber 1990 von 69 %.

Zudem hat das kostenoptimale Szenario die höchste Minderung des Endenergieverbrauchs unter den analysierten Verkehrsszenarien. Es wird darin eine Minderung gegenüber 2005, dem Basisjahr des Energiekonzeptes der Bundesregierung, um 44 % erreicht (Ziel Energiekonzept: 40 %).

Im Folgenden ist die Transformation des **Straßenverkehrs** im Bereich der verschiedenen Kraftstoffnutzungen und Antriebstechnologien hin zur Versorgung mit direkter Stromnutzung und strombasierten Kraftstoffen dargestellt (Abbildung 0-9). Für den **Individualverkehr** gewinnen dabei insbesondere Elektroautos langfristig eine dominierende Rolle.

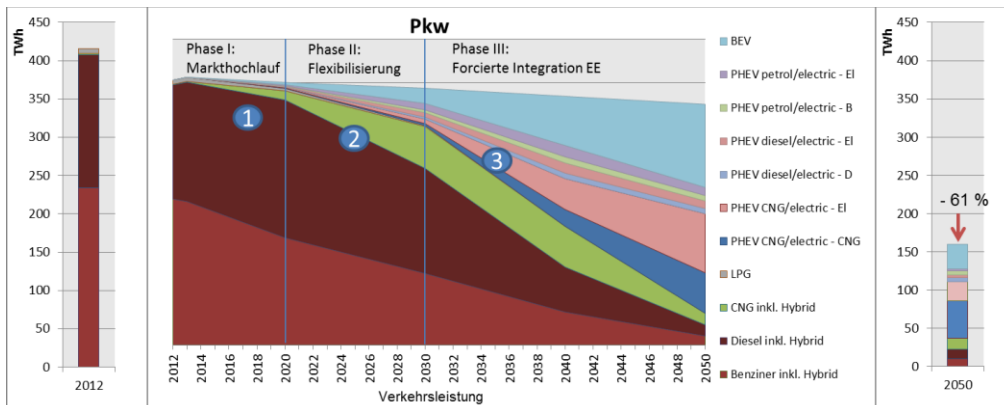


Abbildung 0-9: Roadmap Individualverkehr Straße (Pkw und LNF)

Im Güterverkehr ist der Oberleitungs-Lkw eine zentrale Technologie zur Dekarbonisierung.

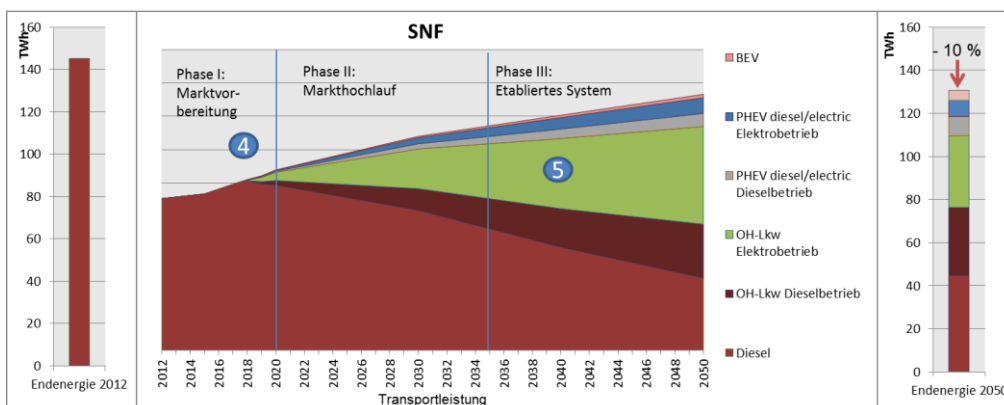


Abbildung 0-10: Roadmap Güterverkehr Straße (SNF)

Die Schlüsseltechnologie des kostenoptimalen Verkehrsszenarios ist die direkte Stromnutzung (Elektrifizierung)

Wesentliche Technologien im kostenminimalen Szenario sind BEV und PHEV bei den Pkw sowie der Oberleitungshybrid-Lkw bei den SNF. Durch die neuen Verbraucher im Verkehr steigt der Strombedarf des Verkehrssektors von heute 17 TWh auf 131 TWh in 2050.

Trotz Effizienzfortschritten bei den konventionellen Verbrauchern steigt u.a. durch den zunehmend über Strom abgedeckten Energiebedarf des Verkehrs der Nettostromverbrauch aller Sektoren im kostenoptimalen Szenario in Deutschland von 557 TWh in 2012 auf 793 TWh in 2050 (+42%). Die weiteren verglichenen Verkehrsszenarien haben im Vergleich dazu, bedingt durch den intensiveren Einsatz von Power-to-X-Technologien, nochmals höhere Strombedarfe.

Für das kostenoptimale Szenario ist das Erreichen des Massenmarktes für die oben genannten Technologien der direkten Stromnutzung erforderlich. Dies ist durch einen entsprechenden regulatorischen Rahmen zu unterstützen:

Bei Pkw und kleinen Lkw benötigt es dafür über den Status Quo hinausgehende finanzielle Förderungen, wie z.B. die Einführung eines Bonus-Malus-Systems entweder als neue „Verschmutzungssteuer“ oder als besondere „Verschmutzungsabgabe“ im Wege der Kfz-Steuer (Zeitliche Einordnung in Abbildung 0-9 -> [1]), die in der aktuellen Markthochlaufphase individuelle Nachteile (Kosten, Reichweite) ausgleichen.

Im Güterverkehr sind für den Einsatz des Oberleitungshybrid-Lkw sowie dem Aufbau der dafür benötigten Infrastruktur überhaupt erst die Voraussetzungen für einen Markthochlauf zu schaffen (Politische Zielsetzung – national und europäisch, Förderung von Demonstrationsvorhaben, regulatorischer Rahmen, Finanzierungsmodelle) (Zeitliche Einordnung in Abbildung 0-10 -> [4]), so dass auch bei einer intensiven Weiterverfolgung dieses Technologiepfades erst langfristig von einem etablierten System ausgegangen werden kann [5]. Die Mittel zum Aufbau der Infrastruktur könnten dabei entweder aus der bestehenden Lkw-Maut oder durch Einführung einer eigenständigen OH-Netz-Maut für alle potentiellen Nutzer finanziert werden.

Der Kostenvorteil der direkten Stromnutzung ergibt sich erst, wenn die Systeme ausgebaut sind

In dem kostenoptimalen Szenario wird die Nutzung der Synergien zwischen den Sektoren insbesondere nach 2035 wichtig, um hohe Mengen anfallenden fluktuierenden PV-Stromes mit den neuen Verbrauchern im Verkehr (z.B. Laden von BEV während der Arbeitszeit) kostengünstig in das System integrieren zu können. Um diese Synergien zu heben, sind mittelfristig Maßnahmen wie die Einführung dynamischer Umlagen oder eine Förderung von öffentlicher und gewerblicher Ladeinfrastruktur notwendig [2].

Eine dynamische EEG-Umlage ist dabei verfassungskonform ausgestaltbar. Die Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut zur Finanzierung der Ladeinfrastruktur ist rechtlich zulässig. Effizienz, Antriebskonzept und externe Kosten der Fahrzeuge sind probate Differenzierungskriterien, dabei ist ein hohes Maß an Datenschutz zu gewährleisten. Die Förderung der Ladeinfrastruktur kann ferner durch Einführung einer verfassungsrechtlich zulässigen Pflicht zur Einrichtung von Stellplätzen mit Anschluss an eine E-Ladesäule unterstützt werden.

Elektromobilität stellt neben einer Erhöhung der Systemeffizienz auch ein hohes Flexibilitätspotenzial zur Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien

In allen betrachteten Verkehrsszenarien werden weiterhin flüssige sowie teilweise gasförmige Energieträger benötigt. Dabei ist die Nutzung von Biokraftstoffen wirtschaftlicher als eine Nutzung von strombasierten chemischen Energieträgern wie Power-to-Gas und Power-to-Liquid, jedoch ist das Potenzial an nachhaltiger Biomasse aufgrund der beschränkten Anbauflächen und Nutzungskonkurrenz begrenzt. Zur Erreichung der Klimaziele müssen daher auch strombasierten chemischen Energieträger im Verkehr eingesetzt werden.

Weiterhin haben, inklusive der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, gasförmige Energieträger in 2050 Kostenvorteile gegenüber flüssigen Kraftstoffen. Eine zusätzliche Kostenminderung des Gesamtsystems kann daher durch den Ersatz von flüssigkraftstoff-betriebenen Verbrennungsmotoren in PHEV durch gasangetriebene Verbrennungsmotoren erreicht werden, für die jedoch der Ausbau einer zusätzlichen Infrastruktur (Gastankstellen) vorangetrieben werden muss [3].

Durch die begrenzte Verfügbarkeit von Biokraftstoffen ist der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen notwendig

Die Fahrzeugkosten der neuen Technologien (Kaufpreis, Abschreibung) sind im zukünftigen Massenmarkt aufgrund von Lernkurveneffekten nicht wesentlich höher als Referenztechnologien heute. Sie sind zwar weiterhin der größte Kostenfaktor im Verkehr, der Kostenunterschied zwischen den untersuchten Verkehrsszenarien wird aber durch die Kosten für die Energiebereitstellung geprägt. Deswegen werden Effizienz und direkte Stromnutzung langfristig entscheidend.

Die Kosten für Antriebstechnologien gleichen sich an, die Kosten der Energiebereitstellung werden entscheidend für die Kostenoptimierung

Die Berücksichtigung der höheren Treibhausgaswirkung von Flugemissionen in großer Höhe bei gleichem Gesamtziel (Europa -80% THG) würde zu einer weiteren zusätzlichen Steigerung des Strombedarfs in Deutschland um 25% führen. Es werden dann deutlich höhere Anteile an erneuerbaren chemischen Energieträgern wie PtG und PtL benötigt.

Werden eine höhere Treibhauswirkung von Flugemissionen in großer Höhe berücksichtigt, hat das große Auswirkung auf den Strombedarf

Unter Effizienz- und Kostengesichtspunkten ist aus heutiger Sicht die direkte Stromnutzung (Batterie, Oberleitung) das optimale System, jedoch werden alle Antriebssysteme sich weiterentwickeln und müssen genau beobachtet werden. Neben den Kostenaspekt sind dabei weitere Punkte mit zu beachten.

Robusten Entwicklungspfad identifizieren

So müssen insbesondere bei den Lkw die wirtschaftlichen Herausforderungen der Energiebereitstellung beim Einsatz von Wasserstoff oder von PtX-Kraftstoffen mit den strukturellen Herausforderungen der Einführung des OH-Lkw abgewogen werden. Dabei ist es einerseits notwendig, technologische Pfade rechtzeitig anzustoßen, um bis 2050 eine entsprechende Marktdurchdringungen zu erreichen, andererseits kann eine verfrühte Einschränkung der Optionen zu deutlichen Mehrkosten führen. Eine intensive Diskussion auf der Basis dieser und weiterer Szenarien ist daher notwendig, um einen robusten Entscheidungs-Korridor zu identifizieren.

Die Rahmenbedingungen und Annahmen zu den Rechnungen sowie die detaillierten Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind in der Langfassung des Endberichtes dargestellt.