

# Transformationsprozess des Energiesystems: Technische Perspektive – Konsistente Gesamtsysteme

Die Entwicklung des deutschen Energiesystems zeichnet sich durch eine zunehmende Wechselwirkung zwischen Verbrauchssektoren und (Strom-)Angebotsseite aus. Der Flexibilisierung der Stromerzeugung und -verwendung kommt eine Schlüsselrolle zu, die sich insbesondere aus dem stark wachsenden Beitrag der fluktuierenden erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung ergibt. Neben dem Stromsektor wird vor allem vom Wärmesektor ein wesentlicher Beitrag zur Absenkung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erwartet.

Im Beitrag werden Ergebnisse aus ganzheitlichen Modellierungen des deutschen Energiesystems dargestellt, aus denen sich insbesondere Hinweise zur zunehmenden Konvergenz von Strom- und Wärmeversorgung ergeben und Empfehlungen zu zukünftigen Konzepten der Wärmeversorgung ableiten lassen.

Übergeordnetes klimapolitisches Ziel der Bundesregierung ist eine langfristig angelegte drastische Absenkung der Treibhausgas-Emissionen. *Abbildung 1* stellt die Zusammensetzung der Treibhausgas-Emissionen in den Jahren 1990 (Referenzjahr für das Kyoto-Protokoll) und 2011, basierend auf Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes (UBA) dar, sowie die politischen Ziele für die Jahre 2020, 2030 und 2040. Für 2050 wird ein Zielkorridor zwischen mindestens 80 % bis 95 % Absenkung gegenüber dem Referenzwert angegeben.

## Dekarbonisierung der Wärmeversorgung

Das wichtigste Treibhausgas ist mit Abstand CO<sub>2</sub> und hier entfällt der größte Anteil der Emissionen auf den Energiesektor. Im Auftrag des Umweltbundesamtes werden die Treibhausgasemissionen für Deutschland auf der Basis von Modellanalysen für im Detail spezialisierte energie- und klimapolitische Instrumente fortwährend analysiert.

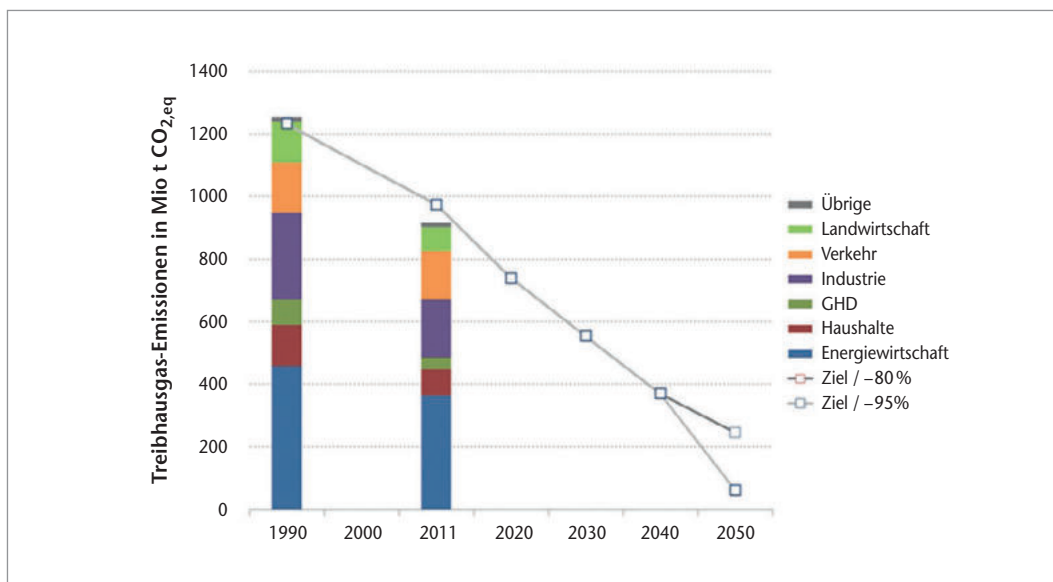
Die jüngste Studie hierzu, die unter Federführung des Öko-Instituts erstellt wurde, bildet zwei Politikscenarien ab – ein sogenanntes „Aktuelle Politik-Szenario“ und ein „Energiewende-Szenario“ – und analysiert darin u. a. Sektor- aufgelöst die Entwicklung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 („Politikscenarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030“. Öko-Institut et al. im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), März 2013). Während im „Aktuelle Politik-Szenario“ die Emissions-Reduktionsziele bis 2030 nicht erreicht werden, werden sie im „Energiewende-Szenario“ leicht übererfüllt. Wie *Abbildung 2* zeigt, sind die zu erwartenden Reduktionsbeiträge im Bereich der Stromerzeugung und der Niedertemperaturwärme (Raumwärme, Warmwasser) überproportional hoch. Für den Wärmesektor resultiert das Ziel einer Reduktion um über 70 % von rund 216 Mio. t äquivalenter CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1990 und 158 Mio. t in 2008 auf rund 58 Mio. t in 2030.



*Fraunhofer ISE*  
Dr. Hans-Martin Henning  
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

*Fraunhofer IBP*  
Dr. Dietrich Schmidt  
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

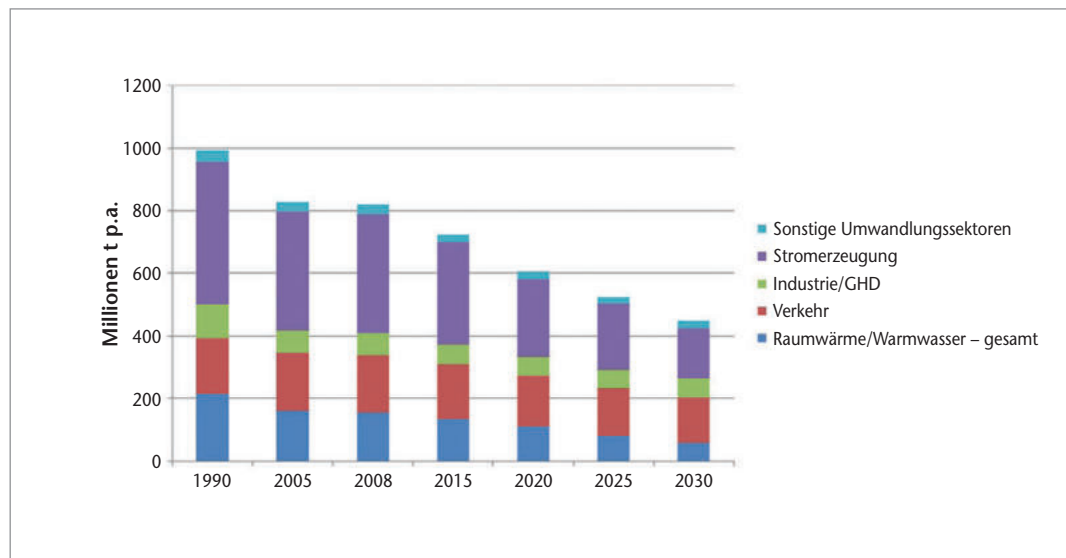
*Fraunhofer IWES*  
Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
clemens.hoffmann@iwes.fraunhofer.de



*Abbildung 1*  
**Treibhausgas-Emissionen:**  
(Soll-)Entwicklung für Deutschland

Abbildung 2

**Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen**  
Sektor-aufgelöste Entwicklung und Prognose der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030. Dargestellt sind die Werte für das Energiewende-Szenario skaliert auf exakte Zielerfüllung, d. h. Absenkung um 55 % bis 2030.



Die zentralen Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Wärmesektor sind einerseits die Verbrauchsreduktion und andererseits die Dekarbonisierung der Versorgungslösungen zur Wärmebereitstellung.

Verbrauchsreduktion bedeutet vor allem die Absenkung des Raumwärmebedarfs in Gebäuden durch Maßnahmen der energetischen Sanierung.

Versorgungslösungen mit reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen können auf unterschiedlichem Weg erreicht werden: einerseits durch Einsatz von erneuerbaren Energien wie Solarthermie, Biomasse, Geothermie oder Strom aus erneuerbaren Energien in Verbindung mit Wärmepumpen oder auch Heizstäben – jeweils in aller Regel in Verbindung mit Wärmespeichern zum Ausgleich zwischen Dargebot und Bedarf – und andererseits durch Verwendung exergetisch günstiger Heiztechniken in Verbindung mit der Nutzung fossiler

Energieträger. Hier sind vor allem Gas-Wärmepumpen und Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung zu nennen. Daneben kann auch die Nutzung von Abwärme für Wärmeanwendungen wie Heizung oder Warmwasser eine Rolle spielen; dies gilt insbesondere für Industrie- und Gewerbebauten aber auch in Verbindung mit Wärmenetzen.

Abbildung 3 zeigt, welcher Mix aus den beiden grundsätzlichen Maßnahmen – Verbrauchsreduktion und Dekarbonisierung der Versorgungslösungen – möglich ist, um den Zielwert von 58 Mio. t äquivalenter CO<sub>2</sub>-Emissionen im Wärmesektor zu erreichen. Es wird deutlich, dass eine Kombination aus weitgehender energetischer Sanierung und Einsatz CO<sub>2</sub>-armer Techniken zur Wärmeversorgung notwendig ist, um die klimapolitischen Ziele zu erreichen. Ein dominanter Einsatz der Direktverbrennung fossiler Energien – Erdgas, Erdöl – wie heute, ist definitiv nicht mit den avisierten Emissionsreduktionszielen vereinbar.

Abbildung 3

**Verbrauchsreduktion und Dekarbonisierung der Wärmeversorgung:**  
Mögliche Kombinationen zur Zielerreichung der klimapolitischen Ziele für den Wärmesektor

Minderungsfaktor Raumwärme	Endenergie Raumwärme	Endenergie Wärmesektor gesamt	Steigerungsfaktor Endenergie pro CO <sub>2</sub> -Emissionen des Wärmesektors bezogen auf heutigen Referenzwert										
			1.00	1.03	1.10	1.17	1.26	1.35	1.46	1.60	1.76	1.95	2.20
MF	EE <sub>RW</sub>	EE <sub>RW</sub> +EE <sub>WW</sub>	CO <sub>2</sub> -Emissionen Wärmesektor in Millionen t										
%	TWh	TWh	155.3	150.3	141.4	132.6	123.8	114.9	106.1	97.2	88.4	79.6	70.7
0%	765	884	141.9	137.3	129.2	121.1	113.0	105.0	96.9	88.8	80.7	72.7	64.6
10%	689	807	128.4	124.3	117.0	109.6	102.3	95.0	87.7	80.4	73.1	65.8	58.5
20%	612	731	115.0	111.3	104.7	98.2	91.6	85.1	78.5	72.0	65.4	58.9	52.4
30%	536	654	101.5	98.2	92.5	86.7	80.9	75.1	69.4	63.6	57.8	52.0	46.2
40%	459	578	88.1	85.2	80.2	75.2	70.2	65.2	60.2	55.2	50.1	45.1	40.1
50%	383	501	74.7	72.2	68.0	63.7	59.5	55.2	51.0	46.7	42.5	38.2	34.0
60%	306	425											

> 70 Mio t

zwischen 58 und 70 Mio t

< 58 Mio t

### Strom-Wärme-System: Optimierung der Systemzusammensetzung

Sowohl aus Gründen der Erschließung von Flexibilisierungspotenzialen in der Stromnutzung als auch vor dem Hintergrund der Notwendigkeit einer CO<sub>2</sub>-armen Bereitstellung von Niedertemperaturwärme für Gebäude scheint es sinnvoll, Strom- und Wärmebereitstellung nicht getrennt zu betrachten, sondern übergreifende Gesamtlösungen zu entwickeln.

Am Fraunhofer ISE wurde hierzu ein ganzheitliches Modellierungsprogramm REMod-D (Regenerative Energien Modell Deutschland) entwickelt. Die grundsätzliche Methodik ist in *Abbildung 4* dargestellt. Darin werden stundenaufgelöst die Stromerzeugung sowie die Energieverwendung in allen Verbrauchssektoren für ein gesamtes Jahr modelliert und so alle Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sektoren einschließlich der Nutzung von Energiespeichern adäquat erfasst. Mittels eines Optimierers kann diejenige Systemzusammensetzung ermittelt werden, die zu niedrigsten Gesamtkosten führt. Gesamtkosten sind dabei als die jährlichen Kosten zum Erhalt und Betrieb des Gesamtsystems definiert. Eine Besonderheit des Programms im Vergleich zu anderen Modellen ist einerseits eine relativ detaillierte Modellierung der unterschiedlichen Versorgungstechniken im Bereich der Wärmeversorgung und andererseits die Einbeziehung der energetischen Sanierung des Gebäudebestands in die Kostenanalyse.

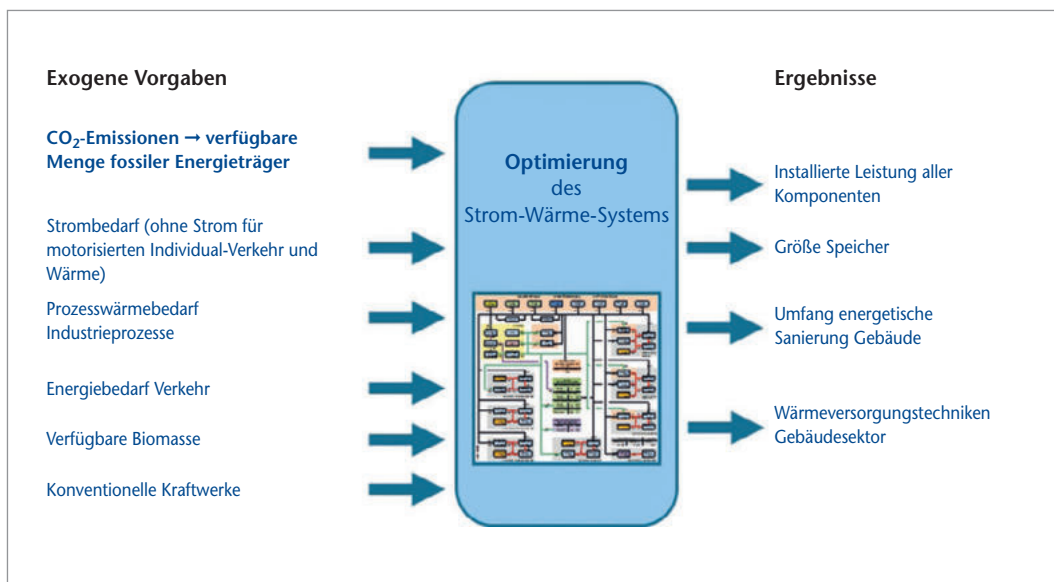
Nachfolgend werden exemplarisch Ergebnisse dargestellt. Bei allen gezeigten Simulationsergebnissen wurde der Wert der CO<sub>2</sub>-Emissionen so limitiert, dass eine Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzwert (1990) um 86 % resultiert; die Ergebnisse stellen also Systeme dar, die

mit den politischen Zielen für das Jahr 2050 kompatibel sind. In der Analyse wird untersucht, welche Auswirkungen der Umfang der energetischen Sanierung und der Ausbau von Wärmenetzen auf das Strom-Wärme-System haben.

*Abbildung 5* zeigt Ergebnisse, bei denen für fixe Werte des Heizwärmebedarfs (angegeben in % des Verbrauchswertes in 2010) und der Abdeckung der Wärmeversorgung über Wärmenetze (angegeben in % des Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser, der durch Wärmenetze gedeckt wird) der jeweils notwendige Umfang des Ausbaus fluktuierender erneuerbarer Energiewandler im Strombereich dargestellt ist.

Es erweist sich, dass unabhängig vom Umfang der Nutzung von Wärmenetzen eine geringere Reduktion des Heizwärmebedarfs einen stärkeren Ausbau an fluktuierenden erneuerbaren Energien bedingt. Eine Absenkung des Heizwärmebedarfs auf nur 60 % des heutigen Wertes benötigt rund 60–70 GW mehr an installierter Leistung für Photovoltaik und Windenergie-Anlagen als eine Absenkung auf 20 %. Zugleich führt jedoch eine stärkere Absenkung des Heizwärmebedarfs zu höheren Gesamtkosten für Erhalt und Betrieb – vereinfacht gesagt, ist ambitionierte energetische Sanierung kostenaufwändiger als die Installation erneuerbarer Energien im Strombereich. Der Ausbau von Wärmenetzen hat dagegen keinen signifikanten Einfluss auf diese Kosten.

*Abbildung 6* macht deutlich, dass bei einem moderaten Ausbau von Wärmenetzen von heute 15 % Abdeckung des Wärmebedarfs auf 25 %, Wärmenetzgebundene Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen die residuale Stromerzeugung nahezu vollständig bereitstellen können.



*Abbildung 4*  
**Modellierungsprogramm REMod-D:** methodisches Vorgehen des Modells. Der Optimierer ermittelt diejenige Zusammensetzung des Strom-Wärme-Systems, die zu niedrigsten jährlichen Gesamtkosten führt.

Abbildung 5

Benötigte installierte Leistung fluktuierender erneuerbarer Energien im Strombereich und jährliche Gesamtkosten für unterschiedliche Zielsysteme im Wärmebereich

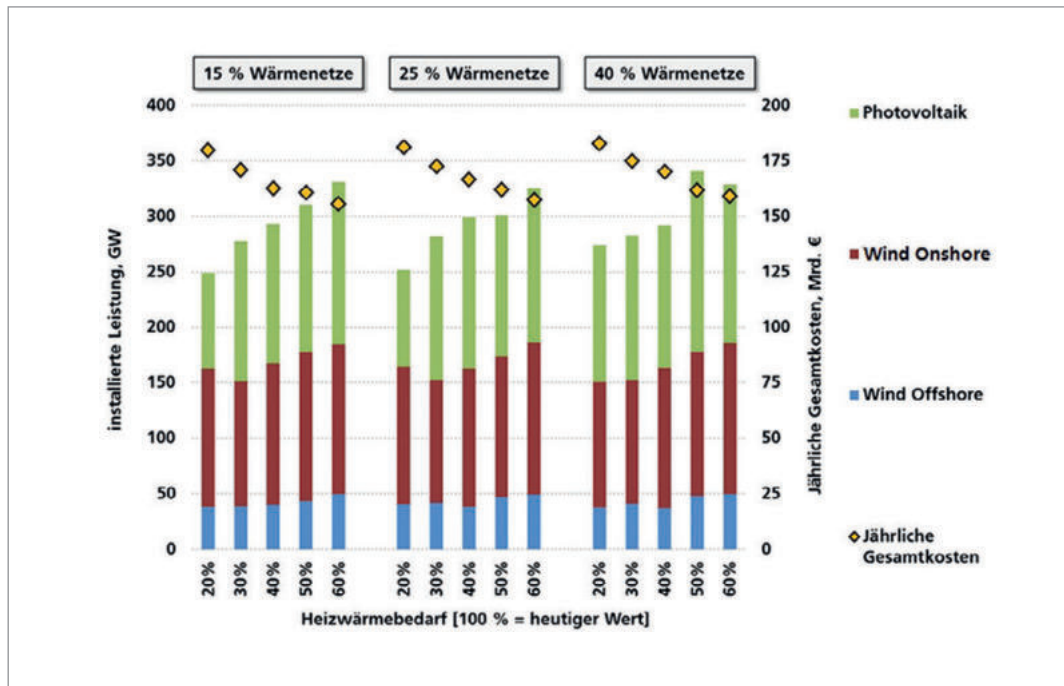


Abbildung 6

Installierte Leistung ( $GW_{el}$ ) residueller Stromerzeugung für unterschiedliche Zielsysteme im Wärmebereich; außerdem ist der sinnvolle Umfang der Installation von großen Solarthermieanlagen angegeben, die in Wärmenetze einspeisen.

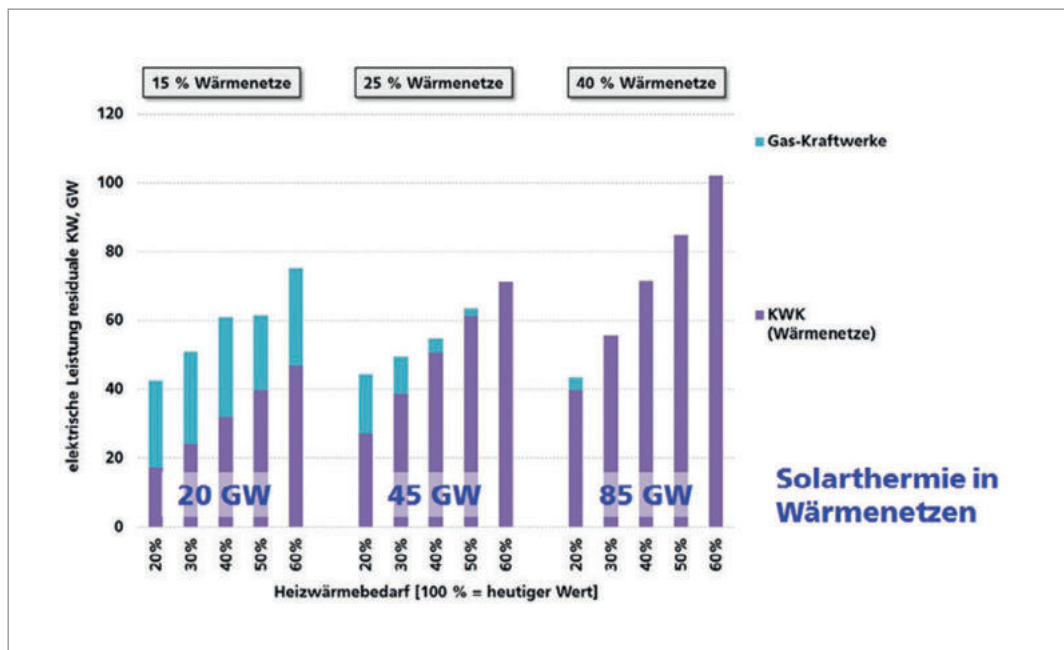


Abbildung 7 zeigt die Zusammensetzung der Wärmeversorgung in Einzelgebäuden, die nicht an Wärmenetze angeschlossen sind. Es zeigt sich, dass hier nur noch Wärmepumpen eine relevante Rolle spielen. Gas-Wärmepumpen nutzen die knappen, noch verfügbaren Brennstoffe (Erdgas, Biomasse) effizient aus. Elektrische Wärmepumpen sind hoch kompatibel mit der Stromerzeugung, die wesentlich durch erneuerbare Energien geprägt ist. In Verbindung mit entsprechend dimensionierten Wärmespeichern, gelingt es, Wärmepumpen so einzusetzen, dass sie überwiegend mit Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien betrieben werden.

Eine Analyse der Stromherkunft elektrischer Wärmepumpen auf Basis aller Stunden eines Jahres zeigt beispielhaft Abbildung 8.

### Umsetzungsbeispiele in Kommunen

#### Wolfhagen 100 % EE – Entwicklung einer nachhaltigen Energieversorgung

Das Mittelzentrum Wolfhagen mit rund 14.000 Einwohnern und elf Stadtteilen auf rund 112 Quadratkilometern ist weitgehend landwirtschaftlich geprägt und liegt knapp 30 km westwärts von Kassel in Nordhessen. Durch diese ländliche Prägung hat Wolf-



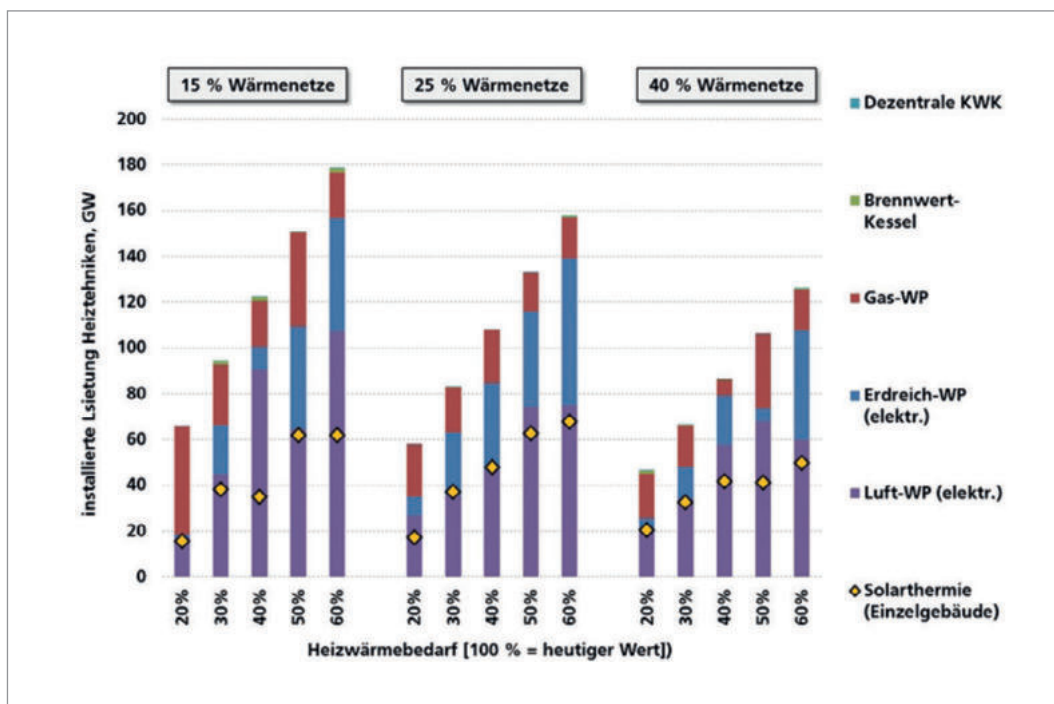


Abbildung 7  
 Installierte Leistung (GWh) von dezentralen Wärmeversorgungs-techniken für unterschiedliche Zielsysteme im Wärmebereich; außerdem ist der sinnvolle Umfang der Installation von dezentralen Solarthermieanlagen dargestellt.

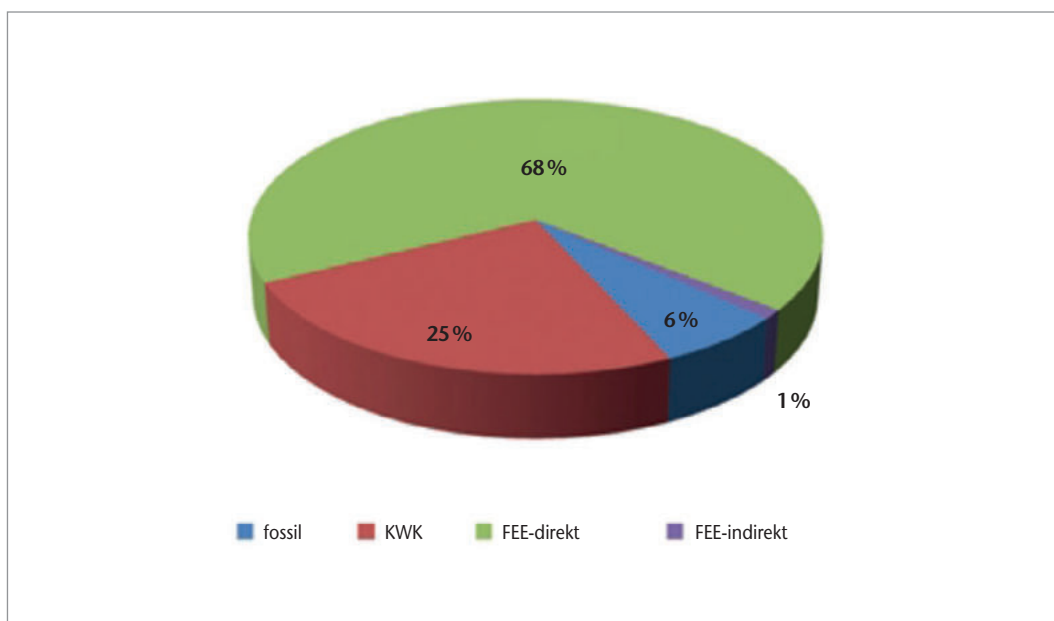


Abbildung 8  
 Herkunft des Stroms elektrischer Wärmepumpen am Beispiel dezentraler Wärmepumpen mit Außenluft als Wärmequelle (FEE = fluktuierende erneuerbare Energien zur Stromerzeugung; FEE-indirekt kennzeichnet FEE-Strom, der in Pumpspeicherkraftwerken oder Batterien zwischengespeichert wurde).

hagen ein wesentlich größeres Potenzial der Nutzung von erneuerbaren Energien, als rein urban strukturierte Räume, wo es häufig schon an den nötigen Flächen für die Aufstellung der Anlagen mangelt. Die Stadt Wolfhagen hat sich gemeinsam mit den Stadtwerken Wolfhagen und den Bürgerinnen und Bürgern schon früh auf den Weg hin zu einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung gemacht und konnte sich als eine der fünf Gewinnerstädte im Wettbewerb: „Energieeffiziente Stadt“ des Bundesministerium für Bildung und Forschung behaupten ([www.wettbewerb-energieeffiziente-stadt.de](http://www.wettbewerb-energieeffiziente-stadt.de)).

Im Fokus der Arbeiten unter Koordination des Fraunhofer IBP stehen insbesondere die energetische quartiersbezogene Gebäudesanierung und eine modulare Energieversorgung, sowie die Einbindung der lokal erzeugten erneuerbaren Energie in zukunftsfähigen Versorgungsstrukturen. So sind in Wolfhagen die quartiersbezogenen Sanierungskonzepte, mit der Nutzung der vorhandenen Speicher, wie Heizungspufferspeicher, Warmwasserspeicher oder der jeweiligen Gebäudemasse selbst, und entsprechende Weiterbildungskonzepte für die Menschen vor Ort von besonderem Interesse ([www.energieoffensive-wolfhagen.de](http://www.energieoffensive-wolfhagen.de)).

### **Masterplan „100 % Klimaschutz“ für Frankfurt am Main**

In Frankfurt/M. gibt es viele Akteure, die sich stark beim Thema „Klimaschutz und Energie“ engagieren. Auf Grund ihrer Größe und ihrer urbanen Struktur hat die Stadt nicht die Möglichkeit, sich aus eigenen und vor Ort zugänglichen Potenzialen erneuerbarer Energien versorgen zu können und ist auf das Zusammenspiel mit den ländlichen Gemeinden in der Umgebung mit deren Windpotenzial angewiesen.

Dennoch besteht in der Stadt selbst ein großes Potenzial zur Nutzung von Solarenergie sowie auch große Potenziale zur Energiespeicherung und Lastverschiebung. Hier bieten sich speziell große Gewerbegebiete an, in denen durch Lastverschiebungsmaßnahmen Kühllasten reduziert werden können und so der Betrieb von z. B. Kälteanlagen in besseren Einklang mit den Anforderungen der Stromnetze gebracht werden kann.

Werden zukünftig vermehrt elektrisch betriebene Wärmepumpen für die Wärmeerzeugung in Gebäuden genutzt, können diese zukünftig auftretende Stromüberschüsse aus dem Umland aufnehmen und die Gebäude lassen sich in der Folge als thermische Speicher nutzen.

Weiterhin bietet das in Frankfurt/M. vorhandene Fernwärmenetz ebenfalls Möglichkeiten der Speicherung thermischer Energie. Schon heute sehen wir den Einsatz von direkt elektrisch betriebenen Nachheizern in Fernwärmenetzen, um entsprechend negative Regelenergie bereitstellen zu können. Auch Heizungspufferspeicher und Trinkwarmwasserspeicher der Haushalte können ggf. überschüssige Energie aufnehmen. Tages- bis sogar Wochenspeicher sind somit in Städten wie Frankfurt/M. vorhanden und sollten genutzt werden. Dadurch lässt sich der Anteil der Nutzung von erneuerbaren Energien in Städten erhöhen, wo sonst nur ein geringerer Anteil Solarthermie und Biomasse genutzt werden könnte ([www.energiereferat.stadt-frankfurt.de](http://www.energiereferat.stadt-frankfurt.de)).

### **Fazit**

Eine umfassende Betrachtung und Modellierung zeigt, dass die klima-politischen Ziele der Bundesregierung durch den Umbau der Energieversorgung hin zur überwiegenden Versorgung mit erneuerbaren Energien erreichbar sind. Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Analyse ist, dass dies langfristig – nach erfolgter Transformation – zu keinen signifikant höheren Kosten im Erhalt und Betrieb des Energiesystems führt als heute; dieser Aspekt konnte in diesem Beitrag nicht vertieft dargestellt werden.

Es wird zugleich deutlich, dass der Umbau nur gelingen kann, wenn zunächst Strom und Wärme – und mittel- und langfristig auch Verkehr und Industrieprozesse – ganzheitlich betrachtet werden und die Nutzungspotenziale für Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien in allen Verbrauchssektoren erschlossen werden.