

# SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

*Materialien*

November 2015

## **Demand-Side-Management im Wärmemarkt**

Technologiesteckbrief zur Analyse  
„Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“

Hans-Martin Henning | Dirk Uwe Sauer (Hrsg.)

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

**Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften**

## Impressum

### Herausgeber

Prof. Dr. Hans-Martin Henning  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany  
E-Mail: Hans-Martin.Henning@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer  
Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen  
Jägerstr. 17/19  
52066 Aachen  
E-Mail: sr@isea.rwth-aachen.de

### Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)  
Residenz München, Hofgartenstraße 2, 80539 München | [www.acatech.de](http://www.acatech.de)

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.  
– Nationale Akademie der Wissenschaften –  
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | [www.leopoldina.org](http://www.leopoldina.org)

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.  
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | [www.akademienunion.de](http://www.akademienunion.de)

### Koordinierungsstelle

Dr. Ulrich Glotzbach  
Leiter der Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft  
Pariser Platz 4a, 10117 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 206 79 57 - 32  
E-Mail: [glotzbach@acatech.de](mailto:glotzbach@acatech.de)

### Koordination / Redaktion

Dr. Berit Erlach, acatech  
Benedikt Lunz, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen  
Dr. Matthias Merzkirch, Karlsruher Institut für Technologie

### Gestaltung und Satz

Annett Eichstaedt, Karlsruhe  
[unicommunication.de](http://unicommunication.de), Berlin

### Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



**Leopoldina**  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



## Inhalt

Inhalt .....	3
Abkürzungen und Einheiten .....	4
Methodik und Arbeitsweise.....	5
1 Vorbemerkung .....	8
2 Brauchwasserwärmepumpe .....	9
2.1 Beschreibung.....	9
2.2 Technische und ökonomische Daten .....	10
2.3 Interdisziplinäre Beurteilung.....	12
2.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit .....	12
2.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf .....	12
3 Hybridwärmepumpe .....	13
3.1 Beschreibung.....	13
3.2 Technische und ökonomische Daten .....	14
3.3 Interdisziplinäre Beurteilung.....	15
3.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit .....	16
3.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf .....	16
4 Kraft-Wärme-Kopplung.....	17
4.1 Beschreibung.....	17
4.2 Technische und ökonomische Daten .....	18
4.3 Interdisziplinäre Beurteilung.....	22
4.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit .....	23
4.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf .....	24
5 Elektrodenheizkessel.....	25
5.1 Beschreibung.....	25
5.2 Technische und ökonomische Daten .....	25
5.3 Interdisziplinäre Beurteilung.....	27
5.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit .....	28
5.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf .....	29
Literatur.....	30

## Abkürzungen

<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerke
<b>JAZ</b>	Jahres-Arbeitszahl
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>RL</b>	Regelleistung

## Einheiten

<b>a</b>	Jahr
<b>€</b>	Euro
<b>GW</b>	Gigawatt (1 GW = $10^9$ W)
<b>GW</b>	Gigawattstunde
<b>°C</b>	Grad Celsius
<b>h</b>	Stunde
<b>kW</b>	Kilowatt (1 kW = $10^3$ W)
<b>kW<sub>e</sub></b>	Kilowatt elektrisch
<b>kW h</b>	Kilowattstunde
<b>min</b>	Minute
<b>MW<sub>e</sub></b>	Megawatt elektrisch
<b>MW</b>	Megawattstunde
<b>s</b>	Sekunde
<b>t</b>	Tonne
<b>TW</b>	Terawatt (1 TW = $10^{12}$ W)
<b>TW h</b>	Terawattstunde
<b>W</b>	Watt

## Methodik und Arbeitsweise

Dieser Steckbrief entstand im Rahmen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Flexibilitätskonzepte des Akademienprojektes Energiesysteme der Zukunft (ESYS). Er dokumentiert die Ergebnisse der Fachgruppe Demand-Side-Management Wärmemarkt.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Flexibilitätskonzepte hat analysiert, wie die Stromversorgung im Jahr 2050 mit einer CO<sub>2</sub>-Einsparung gegenüber 1990 von 80 bis 100 Prozent gestaltet werden könnte. Dabei lag der Fokus darauf, wie die Versorgungssicherheit in der Stromversorgung bei einem wachsenden Anteil volatil einspeisender erneuerbarer Energien sichergestellt werden kann. Für verschiedene Szenarien wurde untersucht, wie die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik sinnvoll durch sogenannte Flexibilitätstechnologien – flexible Stromerzeuger, Demand-Side-Management, Speicher und Netzausbau – ergänzt werden kann. Hierbei war es das Ziel, sämtliche Möglichkeiten zur Bereitstellung von Flexibilität zu erfassen und zu charakterisieren, um deren Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlich ausgeprägten Stromsystemen im Jahr 2050 zu identifizieren.

Um eine valide und aussagekräftige Datenbasis zu erhalten, wurde ein breiter Konsultationsprozess mit Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft durchgeführt. In zehn Fachgruppen wurden die verschiedenen Technologien zur Bereitstellung von Flexibilität analysiert und einer einheitlichen interdisziplinären Bewertung unterzogen.

Die Fachgruppen bearbeiteten folgende Themenkomplexe:

- Windkraftanlagen
- Photovoltaik
- Bioenergie
- Solarthermische Kraftwerke
- Geothermische Kraftwerke
- Konventionelle Kraftwerke
- Energiespeicher
- Demand-Side-Management im Strommarkt
- Demand-Side-Management im Wärmemarkt
- Stromnetze

Der Stand der Technik und die Entwicklungspotenziale für die Zeithorizonte 2023 und 2050 sowie der Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurden soweit wie möglich erfasst. Als Basis für die Modellrechnungen, die für die anschließende Analyse *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge*<sup>1</sup> durchgeführt wurden, wurden Technologieparameter wie zum Beispiel Kostendaten und Wirkungsgrade geschätzt. Außerdem wurden Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz, der Materialverfügbarkeit und relevante Aspekte des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bau- und Emissionsschutzrechts zur Umsetzung der verschiedenen Technologien diskutiert und mithilfe einer Ampelsystematik bewertet. Das Bewertungsschema ist in Tabelle 1

---

<sup>1</sup> Elsner et al. 2015.

dargestellt. Die Ergebnisse der interdisziplinären Bewertung wurden als Diskussionsgrundlage verwendet, um die Parametersätze für die Modellrechnungen zu definieren.

	Materialverfügbarkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Energiewirtschaftsrecht inkl. Regulierung	Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht	Technologie
	Verfügbarkeit so hoch, dass Einsatz nicht limitiert ist. Keine Maßnahmen zur Sicherung der Ressourcen erforderlich	Hohe Akzeptanz: Weder lokal noch national sind Einwände zu erwarten	Kein Handlungsbedarf, entwickelt sich im bestehenden Rechtsrahmen gut	Keine Konflikte erkennbar	Die Technologie ist bereits heute weit entwickelt und großtechnisch einsetzbar. Es besteht ausreichend Betriebserfahrung.
	Verfügbarkeit vorhanden, aber Maßnahmen zur langfristigen Sicherung erforderlich (zum Beispiel kontinuierliche Innovationsanstrengungen wie Exploration, Verbesserung der Akzeptanz, politische Maßnahmen)	Generell hohe Akzeptanz: Geringe Einflussfaktoren sind möglich, die bei der Umsetzung der Technik Beachtung finden sollten.	Probleme durch leichte Anpassung des bestehenden Rechts möglich (Verordnungen)	Probleme durch leichte Anpassung des bestehenden Rechts möglich (Verordnungen)	Die Technologie ist weit entwickelt. Mehrjährige erfolgreiche Betriebserfahrung mit Demonstrationsanlagen unter realistischen Bedingungen
	Unter bestimmten Umständen könnte die Verfügbarkeit kritisch werden, erhebliche Maßnahmen zur Sicherung der Ressourcen erforderlich. Recycling jenseits des Energieoptimums notwendig	Akzeptanz regional/lokal fraglich. Umfangreiche Aufklärung erforderlich. Verantwortliche müssen Akzeptanzprobleme beachten	Umfangreiche Änderungen und neue Gesetze notwendig	Umfangreiche Änderungen und neue Gesetze ohne Absenkung von Standards notwendig	Keine Erfahrung mit großtechnischen Anlagen, Erhebliche F&E-Anstrengungen sind bis zur großtechnischen Umsetzbarkeit erforderlich
	Verfügbarkeit kritisch, so dass Alternativtechnologien in Erwägung gezogen werden müssen, wenn es nicht gelingt, die Verfügbarkeit erheblich zu verbessern	Akzeptanz gering. Um Technik in relevantem Umfang einzusetzen, sollte Bevölkerung in Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden	Umfangreiche Änderungen erforderlich, die möglicherweise nicht umsetzbar sind	Umsetzung der Technologie bei umfassender Überarbeitung des Bau-, Umwelt- oder Immissionsschutzrechts in Europa möglich, Absenkungen von Standards notwendig	Technologie in frühem Entwicklungsstadium. Auch mit größeren F&E-Anstrengungen ist die großtechnische Umsetzbarkeit 2050 ungewiss
	Verfügbarkeit so gering, dass Technologie nicht in relevantem Umfang einsetzbar ist	In Deutschland nicht (mehr) durchsetzbar	Für einen Betrieb der Technologie notwendiger Rechtsrahmen aus heutiger Sicht nicht möglich oder sinnvoll	Für einen Betrieb der Technologie notwendige Veränderungen des Rechtsrahmens aus heutiger Sicht nicht möglich	Großtechnische Umsetzbarkeit bis 2050 unwahrscheinlich

**Tabelle 1: Bewertungsschema für die interdisziplinäre Betrachtung jenseits der technisch-ökonomischen Bewertung in einem Ampelschema mit fünf Abstufungen von grün bis rot<sup>2</sup>**

Die gleichnamigen *Steckbriefe* stellen das Ergebnis der Datenerhebung und Technologiebewertung durch die Fachgruppen von Mai bis November 2014 dar. Im Rahmen einer dreitägigen Klausurtagung vom 02. bis 04. Dezember 2014, an der die Leiter der Fachgruppen teilnahmen, wurden die Ergebnisse der Fachgruppen vorgestellt und diskutiert. Darauf basierend wurde der Satz an Flexibilitätstechnologien, die in den Modellrechnungen berücksichtigt werden, ausgewählt, und die Modellierungsannahmen (zum Beispiel Wirkungsgrade, Kosten) wurden festgelegt. Im Sinne der Konsistenz wurde dabei für die Modellrechnungen teilweise von den in den Steckbriefen dargestellten Zahlenwerten abgewichen. Der vollständige Satz an Modellierungsparametern ist im Anhang der Analyse<sup>3</sup> dokumentiert.

Die Steckbriefe stellen eine von Expertinnen und Experten erstellte Datensammlung für Technologien im Energiesystem dar. Diese richtet sich unter anderem an Energiesystem-Modellierer, denen sie als

<sup>2</sup> Auch bei hoher Materialverfügbarkeit (dunkelgrün, hellgrün) ist das Recycling von Metallen sinnvoll, da es energetisch günstiger ist als die Primärgewinnung, außer wenn die Metalle in höchst komplexen Materialien mit anderen Metallen vermischt sind. Bei schlechterer Verfügbarkeit (gelb, orange) ist Recycling auch bei niedrigen Konzentrationen und komplexer Vermischung sinnvoll (vgl. Wellmer/Herzig 2016).

<sup>3</sup> Elsner et al. 2015.

Grundlage für die Darstellung verschiedener Technologien im Modell dienen kann. Außerdem stellen sie dem Fachpublikum Hintergrundinformationen zur Herleitung der Parameter für die in der Ad-hoc-Gruppe durchgeführten Modellrechnungen zur Verfügung, um diese nachvollziehbar zu machen.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Damit möchte die Arbeitsgruppe die verwendete Datengrundlage transparent machen – im Sinne der im Projekt ESYS definierten Anforderungen an Energiesystemmodelle für die wissenschaftliche Politikberatung (vgl. Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015).

## 1 Vorbemerkung

Wärmepumpen oder Heizstäbe für die Raumheizung können insbesondere in Verbindung mit Wärmespeichern oder auch unter Ausnutzung der thermischen Masse von Gebäuden einen erheblichen Beitrag zur flexiblen Stromnutzung leisten. Dennoch wurden diese Systeme im Rahmen der Arbeiten in der Ad-hoc-Gruppe *Flexibilitätskonzepte*<sup>5</sup> nicht behandelt, da ihr möglicher Beitrag jahreszeitlich schwankt und – naturgemäß – in der Heizperiode eher gegeben ist als außerhalb der Heizperiode. Es wurden deshalb nur solche Systeme betrachtet, die mehr oder weniger gleichmäßig über das gesamte Jahr einen flexiblen Betrieb in Wechselwirkung mit dem Stromnetz erlauben.

---

<sup>5</sup> Elsner et al. 2015.



## 2 Brauchwasserwärmepumpe

### 2.1 Beschreibung

Elektrisch angetriebene Brauchwasserwärmepumpen stellen Warmwasser für die Versorgung von einzelnen Wohneinheiten (Wohnung, Ein- bis Zweifamilienhaus) zur Verfügung. Im Gerät sind dabei Wärmepumpe und Warmwasserspeicher als eine feste Einheit verbaut (siehe Abbildung 1).

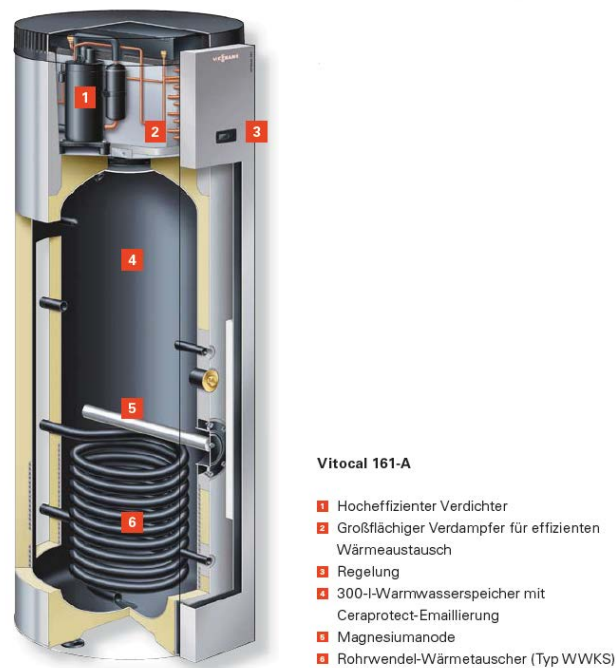


Abbildung 1: Anlagenschema Brauchwasserwärmepumpe<sup>6</sup>

Elektrische Wärmepumpen basieren auf dem Clausius-Rankine-Prozess. Damit wird Wärme, die auf niedrigem Temperaturniveau zugeführt wird, auf ein ausreichend hohes Temperaturniveau angehoben, um Raumwärme beziehungsweise Wärme zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser zu liefern. Wärme auf niedrigerem Temperaturniveau wird der Umwelt entzogen. Bei den Brauchwasserwärmepumpen wird als Quelle für die Umweltwärme entweder die Luft aus dem Aufstellraum (Keller, Garage etc.) verwendet oder die Abluft aus einer mechanischen Wohnungslüftung. Ein Betrieb direkt mit Außenluft wird nur von sehr wenigen Geräten unterstützt (Abschaltgrenze  $\sim 5$  °C). Die Wärmequelle ist der Speicher zur Erwärmung von Trinkwasser. Die Effizienz von Wärmepumpen wird durch die Arbeitszahl, definiert als das Verhältnis aus gelieferter Nutzwärme und zugeführter elektrischer Energie, beschrieben. Sie hängt von der Differenz der Temperaturen von Wärmequelle und Wärmequelle ab: Je höher diese Temperaturdifferenz, desto niedriger ist die Arbeitszahl. Die jährliche Performance von Wärmepumpen wird durch die Jahres-Arbeitszahl (JAZ) beschrieben. Diese liegt für Brauchwasserwärmepumpen typischerweise im Bereich 2,0 bis 3,0.

<sup>6</sup> Viessmann 2014.

Einige Geräte besitzen zusätzlich zur Möglichkeit der Beheizung mit Wärmepumpe einen elektrischen Heizstab (ca. 2 kW) und/oder die Möglichkeit der Beheizung über eine externe Quelle (Biomasse-Kessel etc.).

Durch die Kopplung mit einem Warmwasserspeicher schwankt bei einer Brauchwasserwärmepumpe der Strombedarf nur gering, etwa durch unterschiedliche Temperatur im Aufstellraum. Durch die Wahl der Quelle (Abluft) ist die Leistung der Wärmepumpe beschränkt im Bereich 1 bis 2 kW thermisch (entspricht 500 bis 700 W elektrisch). Es wird ein Speicher verwendet, der den Tagesbedarf an Warmwasser aufnimmt und die kurzzeitigen Warmwasserentnahmen von der nötigen langen Laufzeit der Brauchwasserwärmepumpe (typisch 5 bis 8 h) entkoppelt. Dieser ohnehin schon vorhandene Speicher kann optimal für eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs genutzt werden, da durch den Speicher die Einschaltzeiten der Wärmepumpe kaum vom Verbrauch abhängen. Ein Problem ist derzeit jedoch die geringe Leistung des Einzelgeräts, die aufgrund des geringen Einsparpotenzials nur äußerst niedrige Anbindungs- und Kommunikationskosten zulässt.

## 2.2 Technische und ökonomische Daten

### Technisch

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ) <sup>7</sup>	negativ/positiv	negativ/positiv	negativ
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in kW	-2,5 <sup>8</sup> /-0,5/+0,5	-2,5/-0,5/+0,5	-2,5/-0,5/+0,5
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Niederspannung		
Typische Anzahl aggregierter Einheiten	200		
Zusätzlicher Effizienzverlust durch Dynamisierung oder zeitliche Verschiebung	JAZ -0,1	JAZ -0,1	JAZ -0,1
Aktivierungszeit in s <sup>9</sup>	< 60 s	< 60 s	< 60 s
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	12	12	12
Bereitstellung Momentanreserve <sup>10</sup> (ja/nein)	nein		
Primärregelfähigkeit <sup>11</sup> (ja/nein)	nein		

**Tabelle 2: Technische Daten Brauchwasserwärmepumpe**

<sup>7</sup> Positive Flexibilität entspricht zum Beispiel Prozessabschaltung, negative Flexibilität Start eines Prozesses (Stromaufnahme).

<sup>8</sup> Bei Nutzung des elektrischen Heizstabs, allerdings deutliche Verschlechterung der Effizienz (JAZ ca. 1,2).

<sup>9</sup> Aktivierungszeit meint hier den Zeitverzug von Aktivierung der Einheit aus einer Netzleitwarte bis zum Beginn der Leistungsbereitstellung (inklusive Kommunikationsweg etc.).

<sup>10</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei Abweichungen von der Nennnetzfrequenz instantan durch interne Messung der Frequenzabweichung die Abgabeleistung zu verändern.

<sup>11</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei maximaler Frequenzabweichung innerhalb von 30 s die angebotene Primärregelleistung bereitzustellen.

**Ökonomisch**

	2023 <sup>12</sup>		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche Investitionen Leistung pro Einheit in €/kW <sup>13</sup>	0	100	0	100
Zusätzliche jährliche Betriebskosten pro Einheit <sup>14</sup> in €	10 (Strom) 10 (Kom.)*	25 (Strom) 30 (Kom.)	10 (Strom) 0 (Kom.)	25 (Strom) 15 (Kom.)
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) ohne DSM in a	20	20	20	20
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM <sup>15</sup> in a	20	20	20	20

Tabelle 3: Ökonomische Daten Brauchwasserwärmepumpe<sup>16</sup>**Technische Potenziale**

	2023	2050
Zeit in h (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/Winter etc.)	12	12
Durchschnittsleistungsaufnahme aller installierten Anlagen in Deutschland MW	$(160.000 + 8 \times 15.000) \times 0,5 \text{ kW}^{17} = 140 \text{ MW}$	$400.000 \times 0,5 \text{ kW} = 200 \text{ MW}$
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr	2.000	2.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (technisches Potenzial)	20 Mio. x 0,5 kW	20 Mio. x 0,5 kW
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	2 Mio. x 0,5 kW = 1.000 MW	2 Mio. x 0,5 kW = 1.000 MW
Maximale Vollzyklen pro Tag	1	1

Tabelle 4: Technische Potenziale Brauchwasserwärmepumpe

<sup>12</sup> Für Anlagen, die in diesem Jahr installiert werden.

<sup>13</sup> Zusätzliche Investitionen fallen zum Beispiel für Kommunikationseinheit, Zähleinheit etc. an. Bei chemischen Prozessen sind zum Beispiel auch zusätzliche Wandlereinheiten nötig.

<sup>14</sup> Kosten fallen zum Beispiel durch Kommunikationsgebühren, Zählergebühren etc. an. Regulatorisch bedingte Kosten (Netznutzungsentgelte) sind hier nicht zu berücksichtigen. Zusätzlicher Wirkungsgradverlust durch dynamisierten Betrieb oder zeitliche Verschiebung wird in die Lebenszykluskostenberechnung aus der vorstehenden Tabelle übernommen.

<sup>15</sup> Dieser Wert soll etwaige Lebensdauereinbußen durch dynamisierten Betrieb berücksichtigen.

<sup>16</sup> Zur Kalkulation der jährlichen Kosten für Strom wurde von einem Strompreis in Höhe von 0,30 €/kW h ausgegangen. \*Kom.: Kosten in € für Kommunikation zur Steuerung in Wechselwirkung mit Stromnetz.

<sup>17</sup> Installation 1990 bis 2013: 165.000, jährlicher Zuwachs (Installation minus Austausch): + 15.000.

## 2.3 Interdisziplinäre Beurteilung

### SWOT-Analyse

<b>intern<sup>18</sup></b>	<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung</li> <li>• Konstanter Wärmebedarf, wenig Schwankung Sommer/Winter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Leistung des Einzelgeräts</li> </ul>
<b>extern<sup>19</sup></b>	<b>Chancen</b>	<b>Risiken</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzer bemerkt Verschiebung der Wärmeerzeugung nicht</li> <li>• Konstanter bis steigender Bedarf an Warmwasser in Deutschland</li> </ul>	

Tabelle 5: SWOT-Analyse Brauchwasserwärmepumpe

## 2.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit

Die Technik steht grundsätzlich zur Verfügung, allerdings ist die Steuerung heute nicht für einen flexiblen Betrieb vorbereitet, und es fehlen standardisierte Schnittstellen und Protokolle für einen Einsatz in der Breite.

## 2.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf

Um einen flexiblen Einsatz in Verbindung mit dem Stromnetz zu ermöglichen, sind standardisierte Schnittstellen und Protokolle erforderlich. Zugleich muss ein finanzieller Anreiz wie zum Beispiel ein zeitlich variabler Stromtarif geschaffen werden, um einen flexiblen Betrieb anzureizen.

<sup>18</sup> Technologieinhärente Faktoren.

<sup>19</sup> Das Technologieumfeld betreffende Faktoren.

### 3 Hybridwärmepumpe

#### 3.1 Beschreibung

Die Hybridwärmepumpe ist eine Kombination aus Wärmepumpe und Kessel. Eine genauere Beschreibung der Wärmepumpe erfolgt in Abschnitt 2.1.

Typischerweise werden für die Wärmepumpe Split-Lösungen mit der Quelle Außenluft eingesetzt, da in Zeiten niedriger Außentemperatur (und dadurch niedriger Effizienz der Wärmepumpe) der Kessel die Wärmeversorgung übernimmt. Hier werden in den bislang bekannten Lösungen Gas-Brennwert-Kessel eingesetzt. Eine Kombination mit einem Öl-Brennwert-Gerät ist auch denkbar, beispielsweise für ländliche Regionen ohne Gasnetz.

Durch die hybride Nutzung von Gas und Strom liegt bei diesen Wärmepumpen die Jahresarbeitszahl mit 3,0 bis 4,0 etwas höher als bei reinen Wärmepumpen mit der Quelle Außenluft.

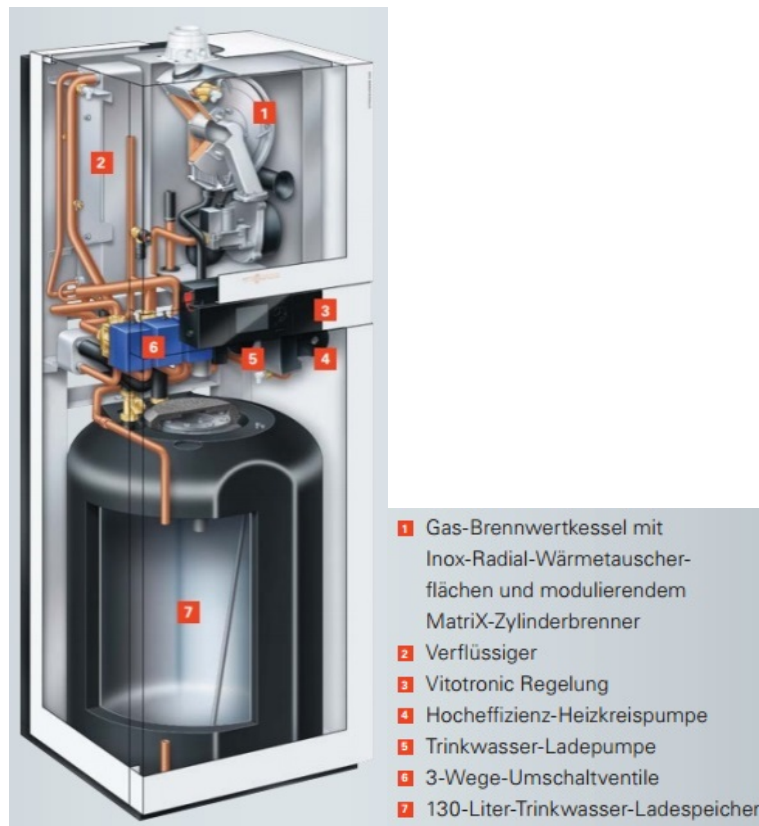


Abbildung 2: Inneneinheit der Hybridwärmepumpe mit integriertem Wärmewasserspeicher<sup>20</sup>

Vorteil der Hybridwärmepumpen für eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs ist, dass ohne den geringsten Komfortverlust und ohne zusätzliche Investitionen zwischen den Energiequellen elektrischer Strom und Gas umgeschaltet werden kann.

<sup>20</sup> Viessmann 2014.

## 3.2 Technische und ökonomische Daten

### Technisch

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ) <sup>21</sup>	positiv/negativ		
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in kW <sup>22</sup>	+/- 2 kW	+/-2 kW	+/-2 kW
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Niederspannung		
Typische Anzahl aggregierter Einheiten	100	100	100
Zusätzlicher Effizienzverlust durch Dynamisierung oder zeitliche Verschiebung	JAZ -0,2	JAZ -0,2	JAZ -0,2
Aktivierungszeit in s	< 60 s	< 60 s	< 60 s
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (positiv) <sup>23</sup>	2 kW/60 s	2 kW/60 s	2 kW/60 s
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (negativ) <sup>24</sup>	2 kW/60 s	2 kW/60 s	2 kW/60 s
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	unendlich		
Mögliche Substitutionszeit von anderen Energieträgern (das heißt Bereitstellung negativer Flexibilität) in s <sup>25</sup> bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	60 s	60 s	60 s
Bereitstellung Momentanreserve <sup>26</sup> (ja/nein)	nein		
Primärregelfähigkeit <sup>27</sup> (ja/nein)	nein		

Tabelle 6: Technische Daten Hybridwärmepumpe

### Ökonomisch

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche jährliche Betriebskosten pro Einheit <sup>28</sup> in €	50 (Strom/Gas) 10 (Kom.)	100 (Strom/Gas) 30 (Kom.)	50 (Strom/Gas) 0 (Kom.)	100 (Strom/Gas) 15 (Kom.)
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer)	20	20	20	20

<sup>21</sup> Positive Flexibilität entspricht zum Beispiel Prozessabschaltung, negative Flexibilität Start eines Prozesses (Stromaufnahme).

<sup>22</sup> Einheiten können je nach Technologie angepasst werden.

<sup>23</sup> Der Leistungsgradient (positiv) beschreibt die Erhöhung der Leistungsaufnahme aus dem Netz.

<sup>24</sup> Der Leistungsgradient (negativ) beschreibt die Erniedrigung der Leistungsaufnahme aus dem Netz.

<sup>25</sup> Gemeint ist zum Beispiel die Substitution von Gaseinsatz durch Strom mit der angegebenen elektrischen Leistung.

<sup>26</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei Abweichungen von der Nennnetzfrequenz instantan durch interne Messung der Frequenzabweichung die Abgabeleistung zu verändern.

<sup>27</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei maximaler Frequenzabweichung innerhalb von 30 s die angebotene Primärregelleistung bereitzustellen.

<sup>28</sup> Diese fallen zum Beispiel für Kommunikationsgebühren, Zählergebühren etc. an. Regulatorisch bedingte Kosten (Netznutzungsentgelte) sind hier nicht zu berücksichtigen. Zusätzlicher Wirkungsgradverlust durch dynamisierten Betrieb oder zeitliche Verschiebung wird in die Lebenszykluskostenberechnung aus der vorstehenden Tabelle übernommen.

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
ohne DSM in a				
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM in a	20	20	20	20

Tabelle 7: Ökonomische Daten Hybridwärmepumpe<sup>29</sup>

### Technische Potenziale

	2023	2050
Zeit (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/ Winter etc.)	unendlich (positive Regelleistung, RL) 4 h (negative RL)	unendlich (positive RL) 4 h (negative RL)
Durchschnittsleistungsaufnahme aller installierten Anlagen in Deutschland in MW	150.000 x 2 kW	400.000 x 2 kW
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr	2.000	2.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland (technisches Potenzial)	20 Mio. x 150.000 x 2 kW	20 Mio. x 400.000 x 2 kW
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland (sinnvoll nutzbares Potenzial)	5 Mio. x 150.000 x 2 kW	5 Mio. x 400.000 x 2 kW
Maximale Vollzyklen pro Tag	1	1

Tabelle 8: Technische Potenziale Hybridwärmepumpe<sup>30</sup>

### 3.3 Interdisziplinäre Beurteilung

#### SWOT-Analyse

	Stärken	Schwächen
intern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung</li> <li>Problemlose Umschaltung zwischen Strom und Gas zur Wärmeversorgung</li> <li>Beliebige Verschiebezeiten positiver Regelleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wenig Wärmebedarf im Sommer und damit geringes Potenzial</li> <li>Kosten für Strom- und Gasanschluss</li> </ul>

<sup>29</sup> Zur Kalkulation der jährlichen Kosten für Strom wurde von einem Strompreis in Höhe von 0,3 €/kW h ausgegangen. \*Kom.: Kosten in € für Kommunikation zur Steuerung in Wechselwirkung mit Stromnetz.

<sup>30</sup> Zur Kalkulation des technischen Potenzials wurde von einem jährlichen Wärmebedarf von 15 MW h pro Gebäude und Jahr ausgegangen.

	Chancen	Risiken
extern	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzer bemerkt Verschiebung der Wärmezeugung nicht</li> <li>• Kostenoptimierung auch bei künftiger Verschiebung der Energiepreise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinkender Wärmebedarf von Privathäusern und damit geringe Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen</li> </ul>

Tabelle 9: SWOT-Analyse Hybridwärmepumpe

### 3.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit

Hybridwärmepumpen befinden sich derzeit in der Markteinführung. Aufgrund des in Deutschland vorhandenen Gasnetzes besteht ein großes Potenzial für diese Geräte, die damit zugleich ein erhebliches Potenzial für flexible Stromnutzung – auch ohne den Einsatz von Speichern – bieten, da ein Umschalten vom Energieträger Strom auf den Energieträger Erdgas (und umgekehrt) je nach Stromverfügbarkeit möglich ist.

### 3.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf

#### Forschungsbedarf/notwendige (Weiter-)Entwicklungen 2023

Um einen flexiblen Einsatz in Verbindung mit dem Stromnetz zu ermöglichen, sind standardisierte Schnittstellen und Protokolle erforderlich. Zugleich muss ein finanzieller Anreiz wie zum Beispiel ein zeitlich variabler Stromtarif geschaffen werden, um einen flexiblen Betrieb anzureizen. Für diesen flexiblen Betrieb sind dann die notwendigen Betriebsführungsstrategien und -algorithmen zu entwickeln.

#### Forschungsbedarf/notwendige (Weiter-)Entwicklungen 2050

Langfristig müssen Hybridwärmepumpen mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben werden können, da im Energiesystem 2050 Erdgas nur noch in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen wird, damit die gesetzten Klimaschutzziele erfüllt werden. Insofern ist eine Adaption der Geräte auf den Betrieb mit unterschiedlichen Energieträgern wie zum Beispiel Biomasse-basierten Brennstoffen notwendig.



## 4 Kraft-Wärme-Kopplung

### 4.1 Beschreibung

Kleine Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Anlagen – in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW) – sind modular aufgebaute Anlagen zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben werden, aber auch Nutzwärme in ein Nahwärmenetz einspeisen könnten. Eine bestehende Heizungsinstallation kann bei Umstellung auf ein Mini-BHKW meist mit geringfügigen Änderungen weitergenutzt werden. Es gibt die Möglichkeit des monovalenten BHKW-Einsatzes unter Einbeziehung größerer Wärmespeicher. Reicht wiederum die Heizung im Winterhalbjahr nicht aus, kann mit dem vorhandenen Brenner oder einem Spitzenlastkessel hinzugeheizt werden (bivalenter Einsatz). Abbildung 3 zeigt ein beispielhaftes KWK-Anlagenschema.

Das Blockheizkraftwerk versorgt das Gebäude mit Haushaltsstrom oder speist in das öffentliche Stromnetz ein. Die Abwärme wird in einen Wärmespeicher (unten Mitte) eingespeist, der bei Bedarf vom Kessel beheizt werden kann. Dem Wärmespeicher wird Wärme zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitstellung entnommen.

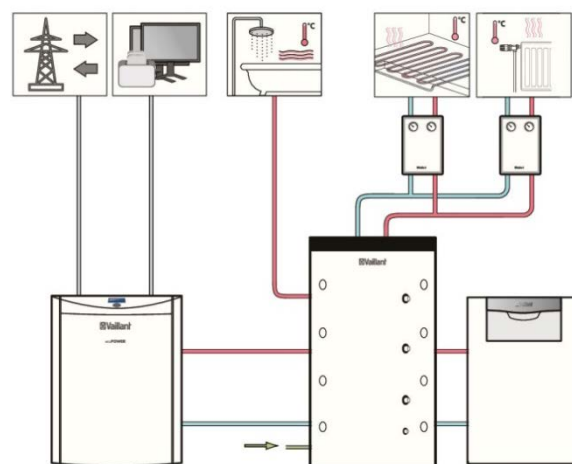


Abbildung 3: Anlagenschema KWK<sup>31</sup>-System mit Blockheizkraftwerk (Bauteil unten links) und Spitzenlastkessel (unten rechts)

<sup>31</sup>Vaillant 2015.

## 4.2 Technische und ökonomische Daten

### Technisch

#### Anlagengröße: 1 kW<sub>e</sub>

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ) <sup>32</sup>	keine	positiv oder negativ	positiv oder negativ
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in kW	1	1	1
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Niederspannung		
Typische Anzahl aggregierter Einheiten	%	100	100
Aktivierungszeit in min	1	1	1
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (positiv)	0,02	0,02	0,02
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (negativ)	0,02	0,02	0,02
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	beliebig (multivalent)		
Mögliche Substitutionszeit von anderen Energieträgern (das heißt Bereitstellung negativer Flexibilität) in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	beliebig (multivalent)		
Bereitstellung Momentanreserve <sup>33</sup> (ja/nein)	nein		
Primärregelfähigkeit <sup>34</sup> (ja/nein)	nein		

Tabelle 10: Technische Daten KWK Anlagengröße 1 kW<sub>e</sub>

#### Anlagengröße: 5 kW<sub>e</sub>

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ)	keine	positiv oder negativ	positiv oder negativ
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in kW	0–5	0–5	0–5
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Niederspannung		
Typische Anzahl aggregierter Einheiten	k. A.	20	20
Aktivierungszeit in min	1	1	1
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (positiv)	0,1	0,1	0,1
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (negativ)	0,1	0,1	0,1
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	beliebig (multivalent)		
Mögliche Substitutionszeit von anderen Energieträgern (das heißt Bereitstellung negativer Flexibilität) in h bei	beliebig (multivalent)		

<sup>32</sup> Positive Flexibilität entspricht zum Beispiel Prozessabschaltung, negative Flexibilität Start eines Prozesses (Stromaufnahme).

<sup>33</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei Abweichungen von der Nennnetzfrequenz instantan durch interne Messung der Frequenzabweichung die Abgabeleistung zu verändern.

<sup>34</sup> Die Anlage muss in der Lage sein, bei maximaler Frequenzabweichung innerhalb von 30 s die angebotene Primärregelleistung bereitzustellen.

	2013	2023	2050
niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)			
Bereitstellung Momentanreserve (ja/nein)	nein		
Primärregelfähigkeit (ja/nein)	nein	nur bei Teil- last-betrieb	nur bei Teil- lastbetrieb

Tabelle 11: Technische Daten KWK Anlagengröße 5 kW<sub>e</sub>**Anlagengröße: 20 kW<sub>e</sub>**

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ)	keine	positiv oder negativ	positiv oder negativ
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in kW	0–20	0–20	0–20
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Niederspannung		
Typische Anzahl aggregierter Einheiten	k. A.	5	5
Aktivierungszeit in min	1	1	1
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (positiv)	0,3	0,3	0,3
Leistungsgradient in kW <sub>e</sub> /s (negativ)	0,3	0,3	0,3
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	x-Stunden je nach Zusatzspeicher		
Mögliche Substitutionszeit von anderen Energieträgern (das heißt Bereitstellung negativer Flexibilität) in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	beliebig (multivalent)		
Bereitstellung Momentanreserve (ja/nein)	nein		
Primärregelfähigkeit (ja/nein)	nein	nur bei Teil- last-betrieb	nur bei Teil- last-betrieb

Tabelle 12: Technische Daten KWK Anlagengröße 20 kW<sub>e</sub>**Anlagengröße: 1 MW<sub>e</sub> (Industrielle KWK)**

Wirkungsgrad (Bestpunkt) in %	77 <sup>35</sup>
Spezifische CO <sub>2</sub> -Emission in t/(GW h) <sub>t</sub>	201,6

Tabelle 13: Technische Daten KWK Anlagengröße 1 MW<sub>e</sub>

<sup>35</sup> Unter Berücksichtigung der Wärmeauskopplung.

## Ökonomisch

### Anlagengröße: 1 kW<sub>e</sub>

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche Investitionen Leistung pro Einheit in €/kW	100	200	50	100
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) ohne DSM in a	15	20	15	20
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM in a	15	20	15	20

Tabelle 14: Ökonomische Daten KWK Anlagengröße 1 kW<sub>e</sub>

### Anlagengröße: 5 kW<sub>e</sub>

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche Investitionen Leistung pro Einheit in €/kW	100	200	50	100
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) ohne DSM in a	15	20	15	20
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM in a	15	20	15	20

Tabelle 15: Ökonomische Daten KWK Anlagengröße 5 kW<sub>e</sub>

### Anlagengröße: 20 kW<sub>e</sub>

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche Investitionen Leistung pro Einheit in €/kW	100	200	50	100
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) ohne DSM in a	15	20	15	20
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM in a	15	20	15	20

Tabelle 16: Ökonomische Daten KWK Anlagengröße 20 kW<sub>e</sub>

### Anlagengröße: 1 MW<sub>e</sub> (Industrielle KWK)

Für diesen Anlagentyp wurden nur Abschätzungen für das Jahr 2050 vorgenommen.

	2050
Abschreibungsdauer in Jahren	25
Invest in €/GW	750.000.000
Jährliche Betriebskosten in %/Invest	1,0
Jährliche Wartungskosten in %/Invest	8,0
Kaltstartkosten <sup>36</sup> in €/GW <sub>e</sub> und Vorgang	30.000
Warmstartkosten in €/GW <sub>e</sub> und Vorgang	5.000
Brennstoffkosten in €/(GW h) <sub>t</sub>	33.100

Tabelle 17: Ökonomische Daten KWK Anlagengröße 1 MW<sub>e</sub>

<sup>36</sup> Zeit, ab der ein Startvorgang als Kaltstart gewertet wird, beträgt 24h.

## Technische Potenziale

### Anlagengröße: 1 kW<sub>e</sub>

	2023	2050
Zeit (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/Winter etc.)	vor allem im Winterhalbjahr hohe Betriebsstunden	
Durchschnittsleistungsaufnahme aller installierten Anlagen in Deutschland in MW	10	50
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr	4.000	4.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (technisches Potenzial)	3.982	4.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	20	100
Verschiebbare Energiemenge in MW h (sinnvoll nutzbares Potenzial)	22.000	110.000
Maximal mögliche Zeitverschiebung der Leistungsaufnahme in h	unendlich (multivalent)	
Maximale Vollzyklen pro Tag	100	100

Tabelle 18: Technische Potenziale KWK Anlagengröße 1 kW<sub>e</sub> <sup>37</sup>

### Anlagengröße: 5 kW<sub>e</sub>

	2023	2050
Zeit (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/Winter etc.)	vor allem im Winterhalbjahr hohe Betriebsstunden	
Durchschnittsleistungsaufnahme aller installierten Anlagen in Deutschland in MW	112	200
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr	4.000	4.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (technisches Potenzial)	973	1.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	225	300
Verschiebbare Energiemenge in MW h (sinnvoll nutzbares Potenzial)	746.000	1.000.000
Maximal mögliche Zeitverschiebung der Leistungsaufnahme in h	unendlich (multivalent)	
Maximale Vollzyklen pro Tag	100	100

Tabelle 19: Technische Potenziale KWK Anlagengröße 5 kW<sub>e</sub> <sup>38</sup>

<sup>37</sup> IZES/Bremer Energie Institut 2011.

<sup>38</sup> IZES/Berliner Energie Institut 2011.

**Anlagengröße: 20 kW<sub>e</sub>**

	2023	2050
Zeit (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/Winter etc.)	vor allem im Winterhalbjahr hohe Betriebsstunden	
Durchschnittsleistungsaufnahme aller installierten Anlagen in Deutschland in MW	460	600
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr	4.000	4.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (technisches Potenzial)	1.283	4.000
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	920	1.200
Verschiebbare Energiemenge in MW h (sinnvoll nutzbares Potenzial)	3.028.000	4.000.000
Maximal mögliche Zeitverschiebung der Leistungsaufnahme in h	unendlich (multivalent)	
Maximale Vollzyklen pro Tag	100	100

Tabelle 20: Technische Potenziale KWK Anlagengröße 20 kW<sub>e</sub><sup>39</sup>**Anlagengröße: 1 MW<sub>e</sub> (Industrielle KWK)**

	2050
Maximal installierbare elektrische Leistung in Deutschland in GW (technisches Potenzial)	4,7 (Industrie)
Maximal installierbare elektrische Leistung in Deutschland in GW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	2,4
Maximal mögliche Zeitverschiebung der Leistungsaufnahme in h	unendlich (multivalent)

Tabelle 21: Technische Potenziale KWK Anlagengröße 1 MW<sub>e</sub>**4.3 Interdisziplinäre Beurteilung****Ampelbewertung**

Materialverfügbarkeit		X			
Gesellschaftliche Akzeptanz		X			
Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung	X				
Bau-, Umwelt- und Immissionschutzrecht	X				
Technologie	X				

Tabelle 22: Ampelbewertung KWK Prozesswärme stromgeführt

<sup>39</sup> IZES/Berliner Energie Institut 2011.

Materialverfügbarkeit		X			
Gesellschaftliche Akzeptanz		X			
Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung		X			
Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht		X			
Technologie			X		

Tabelle 23: Ampelbewertung Erzeugung Hochtemperaturwärme Industrie

### SWOT-Analyse

	Stärken	Schwächen
intern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Verschiebungsflexibilität durch häufig zusätzlich installierte Ersatzheizungen und Wärmespeicherkapazitäten</li> <li>Leistungsmodulierter Betrieb bereits heute Stand der Technik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Saisonale Schwankungen im Wärmebedarf</li> <li>Bei längerer Wärmespeicherung Energieverluste</li> </ul>
	Chancen	Risiken
extern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzer bemerkt Verschiebung der Wärmeerzeugung in den BHKW nicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sinkender Wärmebedarf führt zu geringeren Ausbauraten</li> </ul>

Tabelle 24: SWOT-Analyse KWK

#### Materialverfügbarkeit

Bei Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Industrie sind die zum Einsatz kommenden Materialien noch unklar.

#### Rechtliche Hindernisse

Für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Industrie ist die Zuordnung der CO<sub>2</sub>-Kosten zu klären.

#### Gesellschaftliche Akzeptanz

Bei einem stromgeführten Betrieb von KWK in gewerblichen Betrieben zur Bereitstellung von Prozesswärme ist die Akzeptanz der Betriebe fraglich. Ein entsprechender Betrieb setzt insofern ausreichende Anreize, beispielsweise in Form zeitvariabler Tarife für Strombezug und Stromeinspeisung, voraus.

## 4.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit

Mikro-BHKW sind Stand der Technik, werden aber heute im Prinzip nicht für Regelleistungsbereitstellung genutzt. Ein ursprünglich in Kooperation der Firmen Lichtblick und VW geplantes „Schwarm-

Kraftwerk“, mit dessen Hilfe auch Regelleistung aus kleinen BHKW bereitgestellt werden sollte, ist zum aktuellen Stand gescheitert. Die Dienstleistung soll jedoch später wieder angeboten werden.<sup>40</sup>

#### 4.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf

##### **Forschungsbedarf/notwendige (Weiter-)Entwicklungen 2023**

Um einen flexiblen Einsatz in Verbindung mit dem Stromnetz zu ermöglichen, sind standardisierte Schnittstellen und Protokolle erforderlich. Zugleich muss ein finanzieller Anreiz wie zum Beispiel ein zeitlich variabler Stromtarif geschaffen werden, um einen flexiblen Betrieb anzureizen.

##### **Forschungsbedarf/notwendige (Weiter-)Entwicklungen 2050**

Langfristig müssen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben werden können, da im Energiesystem 2050 Erdgas nur noch in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen wird, damit die gesetzten Klimaschutzziele erfüllt werden. Insofern ist eine Adaption der Geräte auf den Betrieb mit unterschiedlichen Energieträgern wie zum Beispiel Biomasse-basierten Brennstoffen notwendig. Dies bedingt insbesondere Entwicklungsarbeiten im Bereich der Brenner und der Wärmeübertrager zur Wärmeauskopplung.

---

<sup>40</sup> Lichtblick 2014.



## 5 Elektrodenheizkessel

### 5.1 Beschreibung

Die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie kann in einer Vielzahl verschiedener Anlagen erfolgen. In diesem Abschnitt werden die Elektrodenheizkessel näher betrachtet. Bei Elektrodenheizkesseln erzeugen mehrere Elektroden Heißwasser oder Dampf. Derzeit findet diese Technologie überwiegend in der Industrie (Prozesswärme) und der öffentlichen Versorgung (Fernwärme) Anwendung, wobei bei letzterer die Bereitstellung von Regelleistung im Vordergrund steht. Aufgrund der Größe der Anlagen (hier 5 bis 50 MW) können diese ohne Pool-Bildung an den Regelleistungsmärkten teilnehmen. Dennoch werden die Anlagen oft in einen Pool integriert, da die Betreiber bereits Regelleistung anbieten und dadurch eine Besicherung der Leistung ermöglicht wird. Abbildung 4 zeigt das Anlagenschema eines Elektrodenheizkessels.

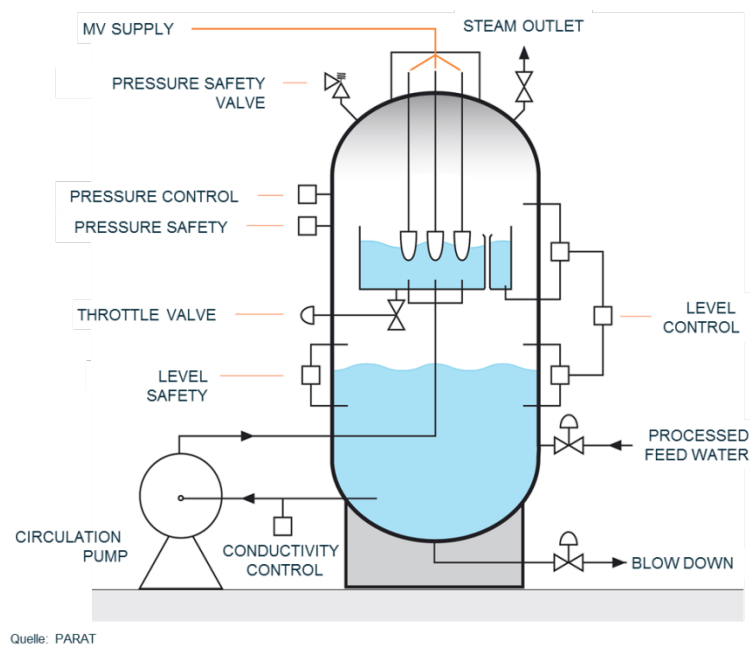


Abbildung 4: Anlagenschema Elektrodenheizkessel<sup>41</sup>

### 5.2 Technische und ökonomische Daten

#### Technisch

	2013	2023	2050
Art der Flexibilitätsbereitstellung (positiv, negativ, positiv/negativ) <sup>42</sup>	negativ	positiv/negativ	positiv/negativ
Typische flexible elektrische Leistung pro Einheit in MW	≤ 70	≤ 70	≤ 70
Typische Netzebene (Nieder-, Mittel-, Hochspannung)	Mittelspannung/Hochspannung		

<sup>41</sup> PARAT 2015.

<sup>42</sup> Derzeit werden Elektrodenheizkessel als negative Regelleistung vermarktet. Zukünftig ist aber auch die Vermarktung von positiver Regelleistung denkbar.

	2013	2023	2050
Typische Anzahl aggregierter Einheiten <sup>43</sup>	1	1	1
Zusätzlicher Effizienzverlust durch Dynamisierung oder zeitliche Verschiebung	0	0	0
Aktivierungszeit in s	0	0	0
Leistungsgradient in MW <sub>e</sub> /s (positiv)	1,65	1,65	1,65
Leistungsgradient in MW <sub>e</sub> /s (negativ)	1,65	1,65	1,65
Mögliche Zeitverschiebung in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert) <sup>44</sup>	unendlich		
Mögliche Substitutionszeit von anderen Energieträgern (das heißt Bereitstellung negativer Flexibilität) in h bei niedriger Außentemperatur (Auslegungswert)	Sekunden <sup>45</sup>	Sekunden	Sekunden
Bereitstellung Momentanreserve (ja/nein)	nein	ja	ja
Primärregelfähigkeit (ja/nein)	ja		

Tabelle 25: Technische Daten Elektrodenheizkessel<sup>46</sup>

### Ökonomisch

	2023		2050	
	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Zusätzliche Investitionen Leistung pro Einheit (ohne Peripherie) in €/kW	40	100	40	100
Zusätzliche Investitionen Energie pro Einheit in €/kW h <sup>47</sup>	11	65	11	65
Zusätzliche jährliche Betriebskosten pro Einheit <sup>48</sup> in €	ca. 500 €/50 MW		ca. 500 €/50 MW	
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) ohne DSM in a <sup>49</sup>	kein unflexibler Referenzbetrieb			
Angenommene Nutzungsdauer (Lebensdauer) mit DSM in a	10	20	10	20

Tabelle 26: Ökonomische Daten Elektrodenheizkessel<sup>50</sup>

<sup>43</sup> Durch die definierte Größe von > 5 MW werden die Anforderungen aus der Präqualifikation für den Regelenergiemarkt bezüglich der Größe erfüllt. Dadurch ist keine Aggregation notwendig.

<sup>44</sup> Unendlich, da angenommen wird, dass die Power-to-Heat-Anlagen als hybride Heizsysteme eingesetzt werden und die Anlagengröße auf die Minimallast des Wärmebedarfs ausgelegt wird.

<sup>45</sup> Der Wert ist bezogen auf einen substituierten Gaskessel.

<sup>46</sup> Herstellerangaben: PARAT, SWFL.

<sup>47</sup> Bei Auslegung auf die Minimallast des Wärmebedarfs wird kein Großwärmespeicher benötigt. Wenn die Anlage größer ausgelegt wird, dienen diese Zahlen als Orientierung für die Investitionen eines Großwärmespeichers. Es wird keine Kostenreduktion angenommen, da es sich bei den Bauwerken um etablierte Technik handelt.

<sup>48</sup> Eigene Schätzung: Ein-Mann-Tag pro Jahr und 50 MW für die Instandhaltung/Wartung.

<sup>49</sup> Variante „ohne DSM“ existiert nicht.

<sup>50</sup> Pellinger/Schmid 2015; 2015; Herstellerangaben: PARAT.

### Technische Potenziale

	2023	2050
Zeit (Werktag/Wochenende/Feiertag; Tag/Nacht; Sommer/Winter etc.) <sup>51</sup>	durchgehend	k. A.
Typische Betriebsstunden (Vollbenutzungsstunden) der Anlagen pro Jahr <sup>52</sup>	kein unflexibler Referenzbetrieb → Betriebsstunden ergeben sich aus der Simulation	k. A.
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in MW (technisches Potenzial)	39 GW (Maximallast der FW-Netze) + 9,4 GW (Industrie)	Übergeordnet: Fernwärmaximallast 2050 + Industrieanteil von 8,15 % an Gesamt-Industrie
Maximal verfügbare Leistung in Deutschland in GW (sinnvoll nutzbares Potenzial)	4,3 GW (Minimallast der Fernwärmenetze) + 4,7 GW (Industrie)	Übergeordnet: Fernwärmaximallast 2050 x 11 % (Minimallast) + Industrieanteil: technisches Potenzial x 50 %
Verschiebbare Energiemenge in TW h	78,8	sinnvoll nutzbares Potenzial x 8.760 h
Maximal mögliche Zeitverschiebung der Leistungsaufnahme in h	unendlich	

Tabelle 27: Technische Potenziale Elektrodenheizkessel<sup>53</sup>

Im Berechnungsmodell wurde bei den Potenzialen konservativ von den Zahlen für 2023 ausgegangen.

#### Lebensdauerverkürzung durch DSM

Elektrodenheizkessel werden ausschließlich zum Zwecke der Lastflexibilisierung eingesetzt. Daher kann keine Lebensdauerverkürzung ausgewiesen werden.

### 5.3 Interdisziplinäre Beurteilung

Materialverfügbarkeit		X			
Gesellschaftliche Akzeptanz		X			
Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung	X				
Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht	X				
Technologie	X				

Tabelle 28: Ampelbewertung Elektrodenheizkessel Fernwärme

<sup>51</sup> Durchgehend, da angenommen wird, dass die Power-to-Heat-Anlagen als hybride Heizsysteme eingesetzt werden und die Anlagengröße auf die Minimallast des Wärmebedarfs ausgelegt wird.

<sup>52</sup> Stunden, in denen Anlagen, die mit dem mittleren Jahresarbeitspreis arbeiten, aktiviert werden.

<sup>53</sup> Pellinger/Schmid 2015.

## SWOT-Analyse

	Stärken	Schwächen
intern	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr geringe spezifische Investitionen</li> <li>• Schnelle Regelbarkeit: auch sehr geringe Einsatzdauern darstellbar</li> <li>• Kein technisches Risiko: Es sind bereits viele Anlagen in Betrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeugung deutlich ineffizienter als aus Wärmepumpen</li> <li>• Keine effiziente Rückverstromung möglich</li> <li>• Wärmespeicher oder gute Regelbarkeit der bestehenden Wärmeerzeugung notwendig</li> </ul>
extern	Chancen	Risiken
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heutiger Bedarf an negativer Regelleistung könnte komplett durch Power-to-Heat bereitgestellt werden: Prinzipiell können alle Fernwärmenetze und viele industrielle Dampfverbraucher mit dieser Technologie ausgestattet werden</li> <li>• Auch industrielle Hochtemperaturwärme kann abgegeben werden</li> <li>• Auch im gewerblichen und privaten Leistungsbereich technisch machbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Potenzial ist auf den Wärmebedarf begrenzt</li> <li>• Gesellschaftliche Akzeptanz: Power-to-Heat wurde lange als nicht ökologisch angesehen</li> <li>• Schlechte Primärenergiebilanz bei geringer EE-Durchdringung: Verschlechterung des Primärenergiefaktors der Fernwärme in den aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen</li> </ul>

Tabelle 29: SWOT-Analyse Elektrodenheizkessel

### Heute bestehende Hemmnisse

Umlagen, Steuern, Entgelte und Abgaben für Letztverbrauch von Strom führen zu Wärmegestehungskosten mit dieser Technologie, die weit über den Wärmegestehungskosten der konventionellen Wärmeerzeugungstechnologien liegen.

### Rechtliche Hindernisse

Elektrodenheizkessel sind bereits im Einsatz, daher sind eher keine Hindernisse bezüglich Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung zu erwarten.

### Gesellschaftliche Akzeptanz

Es bestehen teilweise gesellschaftliche Vorbehalte gegen die Umwandlung von Strom (hochwertige Energieform) zu Wärme (minderwertige Energieform) – insbesondere, wenn nicht sichergestellt werden kann, dass ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien in Wärme umgewandelt wird.

## 5.4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit

### Beispiele bereits realisierter Projekte

- Infraserv GmbH (40 MW)
- Stadtwerke Flensburg (30 MW)
- Stadtwerke Lemgo (5 MW)
- Premnitz (2 x 10 MW)

- und viele mehr

#### **Wichtige Komponentenhersteller**

- Parat Halvorsen AS
- Klöpffer-Therm GmbH & Co. KG
- Aktive Energi Anlæg A/S
- ELMESS-Thermosystemtechnik GmbH & Co. KG
- OhmEx Industrielle Elektrowärme GmbH
- Schniewindt GmbH & Co. KG
- VAPEC AG

Aktuell gibt es zumindest europaweit einen Markt für die Technologie.

### 5.5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf

#### **Notwendige (Weiter-)Entwicklungen 2023**

Um einen flexiblen Einsatz in Verbindung mit dem Stromnetz zu ermöglichen, sind standardisierte Schnittstellen und Protokolle erforderlich.

## Literatur

Alle Daten ohne weitere Quellenangaben basieren auf Erfahrungswerten der Mitwirkenden der Fachgruppe sowie eigenen Berechnungen und Abschätzungen der Autoren. Die Urheber räumen ein Nutzungsrecht für die Verwendung der Abbildungen in diesem Technologiesteckbrief im Rahmen der Online-Publikation ein.

### **Elsner et al. 2015**

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Analyse: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

### **IZES/Bremer Energie Institut 2011**

Institut für ZukunftEnergieSysteme/Bremer Energie Institut: „Erschließung von Minderungspotenzialen spezifischer Akteure, Instrumente und Technologien zur Erreichung der Klimaschutzziele im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (EMSAITEK)“, Endbericht zu PART III: *Beitrag von Mini-KWK-Anlagen zur Zielerreichung der Nationalen Klimaschutzinitiative*, 2011. URL: [http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/EM\\_9\\_40\\_Teil\\_3.pdf](http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/EM_9_40_Teil_3.pdf) [Stand: 05.06.2015].

### **Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015**

Leopoldina/acatech/Akademienunion (Hrsg.): *Stellungnahme: Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

### **Lichtblick 2014**

Lichtblick: Schneller Strom für einen stabilen Pulsschlag im Netz, 2014. URL: <https://www.lichtblick.de/privatkunden/schwarm-energie> [Stand: 16.09.2015].

### **PARAT 2015**

PARAT: Produkte, 2015. URL: <http://www.parat.no/ieh/> [Stand: 26.08.2015].

### **Pellinger/Schmid 2015**

Pellinger, C./Schmid, T.: Merit-Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 – Entwicklung und Darstellung kostenoptimierter Speicherinfrastrukturen in Form von Merit Order Kurven, Laufendes Projekt mit FKZ 03ESP110a, München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2015. URL: <http://www.ffe.de/die-themen/speicher-und-netze/414> [Stand: 01.11.2015].

### **SWFL 2012**

Hartmann, Claus: Flexibilisierung und strommarktorientierte Einsatzplanung des Heizkraftwerks Flensburg in: *ver.di-Forum*. Flensburg: Stadtwerke Flensburg GmbH, 2012.

### **Vaillant 2015**

Vaillant: Anlageschema, 2015.

### **Viessmann 2014**

Viessmann: Heizen mit Luft- und Erdwärme, Broschüre 2014.

**Wellmer/Herzig 2016**

Wellmer, F.-W./Herzig, P.: Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016 i. E.

## Über das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Acht Arbeitsgruppen bündeln fachliche Kompetenzen und identifizieren relevante Problemstellungen. Interdisziplinär zusammengesetzte Ad-hoc-Gruppen erarbeiten Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energiewende.

### Die Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“

Die Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“ hat sich mit der Frage beschäftigt, wie die Versorgungssicherheit in der Stromversorgung bei einem wachsenden Anteil volatil einspeisender erneuerbarer Energien sichergestellt werden kann. Sie hat untersucht, wie die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik sinnvoll durch flexible Stromerzeuger, Demand-Side-Management, Speicher und Netzausbau ergänzt werden kann. Als Zeithorizont wurde das Jahr 2050 betrachtet. Neben dem Technologiebedarf und den Kosten wurden auch die gesellschaftlichen Implikationen sowie der Ressourcenbedarf unterschiedlicher Gestaltungsoptionen für das Energiesystem beleuchtet.

Zur Ad-hoc-Gruppe gehören elf Fachgruppen mit Experten aus Wissenschaft und Industrie. Die Ergebnisse wurden in drei Formaten aufbereitet.

Die **Technologiesteckbriefe** dokumentieren Details zu den einzelnen Technologien und stellen den Stand der Technik ausführlich dar, zeigen Entwicklungspotenziale auf und beschreiben den Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Anhand einer interdisziplinären Matrix wurden alle Technologien im Hinblick auf Ressourcenverfügbarkeit, gesellschaftliche Akzeptanz, technischen Reifegrad und relevante Aspekte des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bau- und Emissionsschutzrechts bewertet. Die Steckbriefe richten sich in erster Linie an Energiesystem-Modellierer, denen hiermit eine aktuelle, von Experten erstellte Datenbasis zur Verfügung gestellt wird.

Weitere Formate von der Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“:

- Die **Analyse** „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge“ dokumentiert die Methodik und die Ergebnisse der Ad-hoc-Gruppe in umfassender Form und setzt diese in Bezug zu energiepolitischen Fragen.
- Die **Stellungnahme** „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien“ stellt die Synthese der Ergebnisse in kompakter, allgemein verständlicher Form dar und zeigt Handlungsoptionen zur Gestaltung der zukünftigen Stromversorgung auf.



## Mitwirkende der Ad-hoc-Gruppe

In der Ad-hoc-Gruppe arbeiteten rund 100 Experten aus Wissenschaft und Industrie mit. Neben Naturwissenschaftlern und Ingenieuren waren auch Wirtschaftswissenschaftler, Psychologen, Politik- und Sozialwissenschaftler vertreten.

### Leitung

Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer	RWTH Aachen

## Mitwirkende der Fachgruppe DSM Wärme

### Fachgruppenmitglieder

Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Leitung)	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Prof. Dr. Dirk-Uwe Sauer (Leitung)	RWTH Aachen, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe
Dr. Dierk Bauknecht	Öko-Institut e. V.
Walter Bornscheuer	Viessmann Deutschland GmbH
Prof. Dr. Harald Bradke	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Competence Centers Energietechnologien und Energiesysteme
Prof. Dr. Clemens Felsmann	Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik
Prof. Dr. Dirk Müller	RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
Raoul Neuhaus	Evonik Industries AG
Jörg Rummen	RWE Effizienz GmbH
Ulrich Schmack	MicrobEnergy GmbH
Dr. Serafin von Roon	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
Dr. Christof Wittwer	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

### Weitere Mitwirkende

Dr. Bernd Hafner	Viessmann Werke
Jochen Conrad	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
Elena Köck	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

### Wissenschaftliche Referenten

Dr. Berit Erlach	acatech
Benedikt Lunz	RWTH Aachen
Dr. Matthias Merzkirch	Karlsruher Institut für Technologie

## Institutionen und Gremien des Akademienprojekts

### Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

### Steuerkreis

Der Steuerkreis koordiniert die Arbeit in acht interdisziplinären, thematischen Arbeitsgruppen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Prof. Dr. Armin Grunwald	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Dr. Peter Herzig	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Ortwin Renn	Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Ferdi Schüth	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
em. Prof. Dr. Rüdiger Wolfrum	Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium

### Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (seit September 2015), Präsident Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste
Prof. Dr. Günter Stock	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (bis August 2015), Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (bis September 2015)
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Vizepräsidentin Leopoldina
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring- Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Klaus Töpfer	Ehemaliger Exekutivdirektor Institute for Advanced Sustainability Studies
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Bildung und Forschung
Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr. Ingrid Wüning Tschol (Gast)	Bereichsdirektorin „Gesundheit und Wissenschaft“ Robert-Bosch-Stiftung

### Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach                      Leiter der Koordinierungsstelle, acatech

## Rahmendaten

### **Projektlaufzeit**

04/2013 bis 02/2016

---

### **Finanzierung**

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2013) und der Robert-Bosch-Stiftung gefördert.

---