

Energiewende im Heizungskeller – Low-Ex-Systeme

1 Hintergrund

1.1 Sektor-bezogene Klimaschutzziele

Der Beitrag des Gebäudesektors zum Erreichen der Klimaschutzziele wird in den strategischen Papieren immer wieder herausgehoben, was angesichts der anteilig hohen CO₂-Emissionen an den Gesamtemissionen auch berechtigt ist. Aufgrund der Langlebigkeit von Gebäuden von im Mittel 50 Jahren und ihrer Versorgung von mindestens 15 Jahren sind die Erneuerungszyklen relativ gering. Das reduziert die Dynamik in diesem Sektor und macht eine langfristige Planung von Phasenübergängen erforderlich. Aufgrund dieser langen Zyklen sind Bestandsgebäude und Neubau gleichermaßen im Fokus, wobei die die Bestandsgebäude die größere Herausforderung sind.

Im Gebäudesektor gibt es zwei wesentliche Handlungsmöglichkeiten zur CO₂-Reduktion:

- Baulicher Wärmeschutz zur Reduktion des Nutzwärmebedarfs
- Dekarbonisierung des Endenergiebedarfs der Heizungstechniken

Abbildung 1 zeigt, dass CO₂-Minderung auf verschiedenen Pfaden möglich ist: Beispielsweise ist eine CO₂-Minderung von 40 % erreichbar sowohl durch eine Reduktion des Endenergiebedarfs für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) auf 47 % und einer Verringerung des CO₂-Aufwandes für die Wärmebereitstellung um 20 % als auch mit einer Reduktion des Wärmebedarfs auf 65 % und des CO₂-Aufwandes um 40 %.

Für eine sichere Erreichung der Klimaschutzziele sind somit abgestimmte Veränderungen in beiden Bereichen notwendig.

1.2 Strukturwandel im Raumwärmesektor

Unterschiedliche Szenarien zur weiteren Entwicklung der Rolle und der Zusammensetzung der Wärmeversorgung variieren in der zukünftigen Zusammensetzung der eingesetzten Technologien je nach angenommener Preisentwicklung und Verfügbarkeit von Energieträgern, insbesondere der Biomasse. Allen gemein ist jedoch, dass der direkte Einsatz von fossilen Brennstoffen mit der Zeit deutlich sinkt.

Beispielhaft geht das DLR in seinem Szenario A für 2050 in der Leitstudie 2011 davon aus, dass eine Reduktion des Raumwärmebedarfs um ca. 60 % erfolgt und dieser verbleibende Bedarf knapp 60 % aus EE gedeckt werden kann und Öl- und Erdgaskessel fast gänzlich aus dem Raumwärmemarkt verbannt sind. Kennzeichnend sind eine stärkere Vernetzung von Strom- und Wärmemarkt durch KWK und Wärmepumpen und ein hohes Wachstum bei Wärmepumpen und Solarthermie (Abbildung 2).

Trotz der unterschiedlichen zugrundeliegenden Annahmen in den Szenarien, was Beiträge einzelner Technologien anbelangt, ist ihnen jedoch gemeinsam, dass sie nur in Systemen mit geringen Temperaturdifferenzen zur Umgebungstemperatur effizient arbeiten können – sogenannten Low-Ex-Systemen.



Fraunhofer ISE
Sebastian Herkel
sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de

ISFH
Jens Glembin
glembin@isfh.de

IZES
Danjana Theis
theis@izes.de

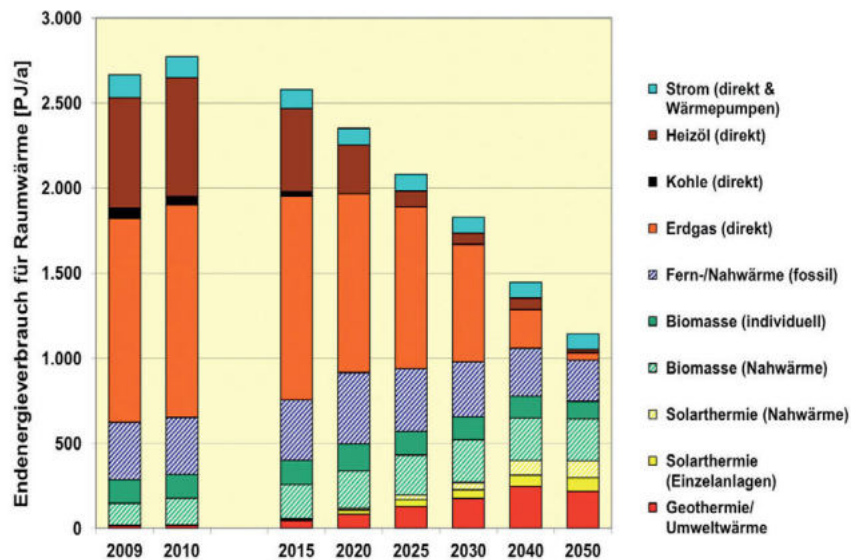
DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

ZSW
Dr. Jann Binder
jann.binder@zsw-bw.de

Endenergie RW	Endenergie RW + WW	spezifische CO ₂ -Emissionen für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) in % bezogen auf den Wert in 2008																			
		100%	96%	94%	92%	89%	87%	84%	82%	80%	77%	75%	73%	70%	68%	66%	63%	61%	59%	56%	54%
EE _{RW}	EE _{RW+WW}	CO ₂ -Emissionen für Raumwärme und Warmwasser in % bezogen auf den Wert in 2008																			
% (2008)	% (2008)																				
100%	100%	100.0	96.2	93.9	91.5	89.2	86.8	84.5	82.1	79.8	77.4	75.1	72.7	70.4	68.0	65.7	63.4	61.0	58.7	56.3	54.0
95%	96%	95.6	92.0	89.7	87.5	85.2	83.0	80.7	78.5	76.3	74.0	71.8	69.5	67.3	65.0	62.8	60.6	58.3	56.1	53.8	51.6
90%	91%	91.2	87.7	85.6	83.4	81.3	79.2	77.0	74.9	72.7	70.6	68.5	66.3	64.2	62.0	59.9	57.8	55.6	53.5	51.4	49.2
85%	87%	86.8	83.5	81.4	79.4	77.4	75.3	73.3	71.3	69.2	67.2	65.2	63.1	61.1	59.1	57.0	55.0	52.9	50.9	48.9	46.8
80%	82%	82.4	79.2	77.3	75.4	73.4	71.5	69.6	67.7	65.7	63.8	61.9	59.9	58.0	56.1	54.1	52.2	50.3	48.3	46.4	44.5
75%	78%	78.0	75.0	73.2	71.4	69.5	67.7	65.9	64.0	62.2	60.4	58.5	56.7	54.9	53.1	51.2	49.4	47.6	45.7	43.9	42.1
70%	74%	73.6	70.8	69.0	67.3	65.6	63.9	62.1	60.4	58.7	57.0	55.2	53.5	51.8	50.1	48.3	46.6	44.9	43.2	41.4	39.7
65%	69%	69.2	66.5	64.9	63.3	61.7	60.0	58.4	56.8	55.2	53.6	51.9	50.3	48.7	47.1	45.4	43.8	42.2	40.6	38.9	37.3
60%	65%	64.8	62.3	60.8	59.3	57.7	56.2	54.7	53.2	51.7	50.1	48.6	47.1	45.6	44.1	42.5	41.0	39.5	38.0	36.5	34.9
55%	60%	60.4	58.1	56.6	55.2	53.8	52.4	51.0	49.6	48.1	46.7	45.3	43.9	42.5	41.1	39.7	38.2	36.8	35.4	34.0	32.6
50%	56%	55.9	53.8	52.5	51.2	49.9	48.6	47.3	45.9	44.6	43.3	42.0	40.7	39.4	38.1	36.8	35.4	34.1	32.8	31.5	30.2
45%	52%	51.5	49.6	48.4	47.2	46.0	44.7	43.5	42.3	41.1	39.9	38.7	37.5	36.3	35.1	33.9	32.7	31.4	30.2	29.0	27.8
40%	47%	47.1	45.3	44.2	43.1	42.0	40.9	39.8	38.7	37.6	36.5	35.4	34.3	33.2	32.1	31.0	29.9	28.8	27.7	26.5	25.4

Abbildung 1
Zielmatrix:
Die beiden Maßnahmen „Baulicher Wärmeschutz“ (senkrechte Spalten links) und „Dekarbonisierung der Heizungstechniken“ (waagerechte Achse) ergänzen sich zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele (grüne Felder in der Matrix).
Quelle: Fraunhofer ISE

Abbildung 2
Szenario zur Entwicklung der Raumwärme bis 2050:
 Szenario A aus der Leitstudie 2011 [DLR]



Für das Wärmeversorgungssystem ist die Agenda bei der Gestaltung der Phasenübergänge der Energiewende deshalb folgende:

- Verbesserung der Effizienz der Energiewandler durch Technologieentwicklung
- Ausbau der erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung
- Anpassung der Übergabesysteme auf Low-Ex-Systeme
- Integration der Wärmeversorgungssysteme in Gas-, Strom- und Wärmenetze.

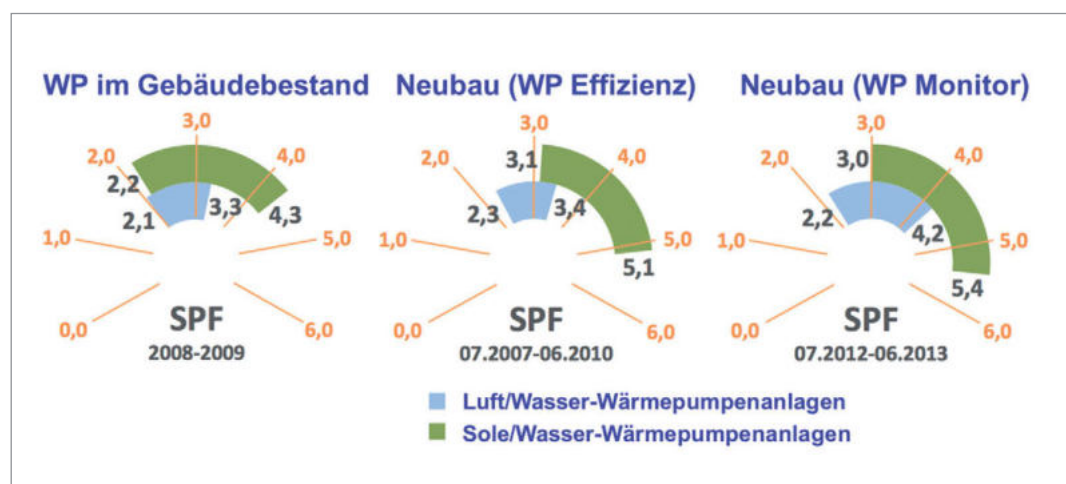
2 Technologieentwicklung und Systemintegration

2.1 Technologieentwicklung: Wärmepumpen

Elektrische Wärmepumpen erreichen heute Jahresarbeitszahlen in realen Anlagen zwischen 3 und 5,4 (Geothermie) und zwischen 2,2 und 4,2 (Luft als Umweltquelle). Die Ergebnisse zeigen zum einen eine kontinuierliche Verbesserung der Anlagen, zum anderen eine große Bandbreite. Die Ergebnisse der einzelnen Anlagen werden bestimmt durch die jeweils eingesetzte Technologie und die Systemeinbindung (Abbildung 3).

Mit neuen Technologieansätzen können die Effizienz gesteigert bzw. die Kosten gesenkt werden. Wichtige neue Felder sind z. B. die hydraulische Optimierung des Kältemittelkreises von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln (Abbildung 4) oder die Entwicklung und Charakterisierung von neuen Konzepten für

Abbildung 3
Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpensystemen
 in drei Messkampagnen (SPF) für unterschiedliche Systemkonfigurationen
 Quelle: Fraunhofer ISE



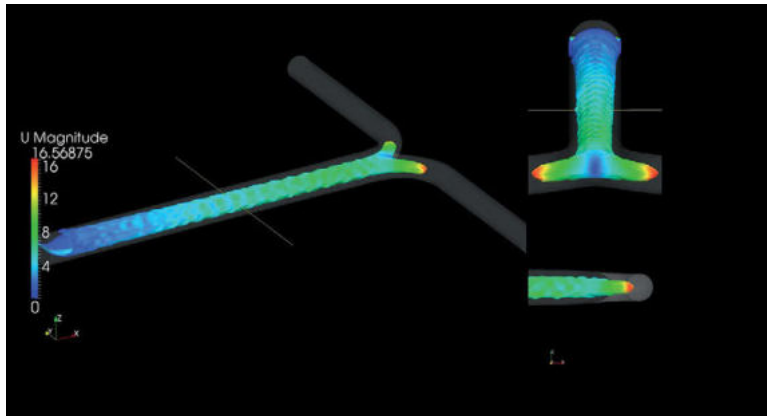


Abbildung 4
Effizienzsteigerung bei Wärmepumpen:
Optimierung des Druckverlustes von Fluidverteiler und Wärmetauscher in einer elektrischen Kompressionswärmepumpe
Quelle: Fraunhofer ISE

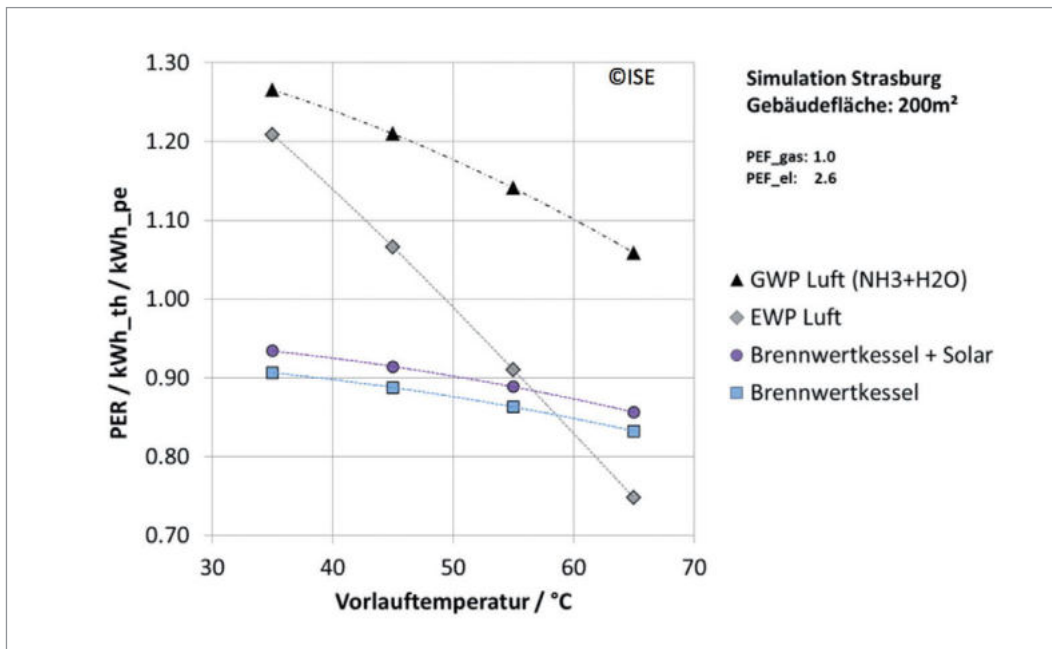


Abbildung 5
Primärenergetischer Wirkungsgrad (PER)
Vergleich des PER einer Gaswärmepumpe (▲) mit anderen Heizsystemen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen
Quelle: Fraunhofer ISE

Wärmeübertrager und Kompositmaterialien für die Nutzung in Adsorptionswärmepumpen. Gaswärmepumpen verbessern den primärenergetisch bewerteten Wirkungsgrad gegenüber Brennwertkesseln deutlich (Abbildung 5).

2.2 Systemintegration: Speicher, Verteilung und Übergabesysteme

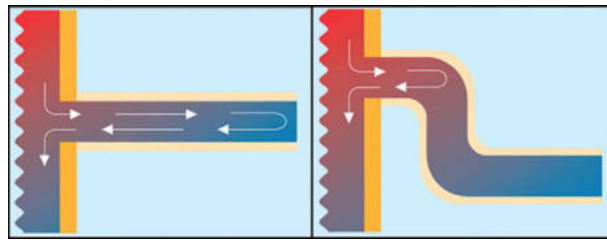
Die Performance von Systemen zur Wärmeversorgung steigt nicht mit einem höheren Grad der Komplexität – auch wenn zur Nutzung der erneuerbaren Quellen Speichersysteme notwendig werden. Eine Queranalyse der Jahresarbeitszahlen von Kombinationssystemen mit Solarthermie und Wärmepumpen im Rahmen der SHC IEA Task 44 HPP Annex 38 zeigt, dass die Performance der Systeme stark streut. Außerdem geht die durch die Einbindung einer solarthermischen Anlage gewonnene Wärme durch

die notwendige Integration von thermischen Speichern zum Teil wieder verloren (s. u.). Für alle Kombinationen der Einbindung von Solarthermie und Wärmepumpen in Speicher zeigt sich, dass die exergetische Effizienz von Wärmespeicher und hydraulischer Verschaltung entscheidend für die System-Effizienz ist.

Kombinationslösungen mit Luft-Wärmepumpen und Solarthermie stellen eine Alternative zu Erdsonden-Wärmepumpensystemen dar: Bei ähnlicher energetischer Performance liegen die Investitionskosten in ähnlichen Größenordnungen, es ist jedoch keine Erdsondenbohrung notwendig und somit liegt ein höheres Potenzial zum Einsatz bei der energetischen Sanierung vor.

Ein weiteres Beispiel für die Verbesserung der Performance von Wärmeversorgungsanlagen sind Maßnahmen zur Reduktion der Wärmeverluste durch Ein-

Abbildung 6
**Minderung der
 Wärmeverluste**
 aus Einrohrzirkulation
 mithilfe von Z-Profilen
 (Quelle: ISFH)



rohrzirkulation – ein unerwünschter Effekt der an Speichern, Kesseln und Verteilern auftritt. Ohne solche Maßnahmen betragen diese Wärmeverluste in Wärmespeichern in Einfamilienhäusern typischerweise 200–400 kWh/a und sind damit allein für ca. 0,15 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. Am ISFH wurden Maßnahmen analysiert und identifiziert, mit denen die Einrohrzirkulation kostengünstig unterdrückt werden kann (*Abbildung 6*).

Sogenannte Low-Ex-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass ihre energetische Performance entscheidend von den Systemtemperaturen abhängt – je niedriger desto besser. Gerade im Gebäudebestand werden jedoch zur Vermeidung von zu großen Heizkörpern hohe Temperaturen bis zu 75 °C gefahren.

Als neuer Ansatz für die Sanierung von Bestandsgebäuden wird am IZES ein System mit außenliegender Wandheizung entwickelt. Dabei wird im Rahmen der energetischen Sanierung der Gebäudehülle zwischen Bestandswand und neuer Wärmedämmung ein Flächenheizsystem aufgebracht, die sogenannte außenliegende Wandheizung. Ein Vorteil des Systems ist, dass die Montage von „außen“, also ohne gravierende Beeinträchtigung der Bewohner möglich ist. Durch die Lage der Heizebene zwischen Bestandswand und Dämmung können bereits mit sehr geringen Vorlauftemperaturen die Wärmeverluste durch die Außenwand kompensiert bzw. überkompensiert werden. Ebenfalls durch die Einbaulage bestimmt, ist dieses Heizsystem sehr träge. Gleichzeitig wird die massive Bestandswand jedoch auch thermisch aktiviert und kann zur Speicherung von Wärme/Kälte genutzt werden.

Wird zwischen dem Flächenheizsystem und der Wärmedämmung ein Luftspalt eingebaut, so kann die außenliegende Wandheizung zur Frischluftherwärmung genutzt werden. Diese Variante wird als außenliegende Luftheizung bezeichnet. Die außenliegende Luftheizung ergänzt die außenliegende Wandheizung ideal, da sie ein schnell regelbares Wärmeübergabesystem darstellt. Ein weiterer positiver Effekt ist die Nutzung noch niedrigerer Vorlauftemperaturen. Erste Simulationsstudien zeigen, dass

eine volle Deckung des Heizwärmebedarfs über die Kombination von außenliegender Wandheizung/ außenliegender Luftheizung möglich ist. Detaillierte Simulationsergebnisse werden 2015 erwartet und veröffentlicht.

Kosteneffizienz ist eine wesentliche Randbedingung, um systemische Lösungen marktfähig zu machen. Das vom ISFH mit Partnern entwickelte Sonnenhauskonzept hat das Ziel, die Kosten für Sonnenhäuser deutlich zu senken. Eine Kostenreduktion zeigt sich dabei bereits in einem ersten Versuchsgebäude im Vergleich zu dem bisher typischen Konzepten. Mit einer solaren Bauteilaktivierung wird die bereits vorhandene Gebäude-Speichermasse kostengünstig erschließbar, so dass mit einem deutlich kleineren Pufferspeicher eine gleich hohe solare Deckung wie in einem Sonnenhaus mit großem Speicher erreicht werden kann. Der erwartete Endenergiebedarf beträgt 8,5 kWh/m²a (elektrisch). Schlüssel für den Erfolg sind die niedrigen Systemtemperaturen, die es erlauben, die solare Wärme häufig und vor allem auch während der Heizperiode direkt nutzen zu können und dass keine Zwischenspeicherung nötig ist. Ein wichtiges Element ist dabei die neu entwickelte Regelung, die die solare Wärme auf die Bauteilaktivierung und den Speicher je nach der zu erwartenden höheren Effizienz verteilt.

3 Netzdienlichkeit von Wärmeversorgungssystemen

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung kann vor allem auch durch einen Umstieg auf elektrische Systeme erreicht werden. Dabei sind jedoch die Wechselwirkungen mit den Netzen, insbesondere mit dem Stromnetz zu beachten. Dafür notwendig sind:

- neue Bewertungsverfahren, die die Wechselwirkung zwischen Wärmeversorgungssystem und Netz charakterisieren und bewerten
- Anpassung der Dimensionierungen der Systeme, der Betriebsweise und der Regelung.

3.1 Bewertung der Netzinteraktion

Netzdienlichkeit von Wärmepumpensystemen
 Zur Bewertung der Netzdienlichkeit dienen zwei dimensionslose Kennzahlen, welche den Strombezug mit einer zeitaufgelösten netzbasierten Referenzgröße (z. B.: Strompreise an der EEX, Residuallast, Kumulierter Energieverbrauch (KEV) oder Anteil von Wind und PV an der Stromerzeugung) gewichten und so beurteilen, ob der Stromverbrauch während, aus Sicht des Energiesystems, günstigen oder ungünstigen Zeiten erfolgt.
 Die Bewertung der Netzdienlichkeit erfolgt mit einer Methodik, die auf zwei dimensionslosen Kennzahlen beruht: dem absoluten „load grid matching coefficient“ LGMCabs und dem relativen „load-grid matching coefficient“ LGMCrel.

Der Ansatz von LGMCabs besteht darin, den zeitaufgelösten Strombezug mit einer Referenzgröße zu „gewichten“, um festzustellen, ob Strom im Mittel zu „günstigen“ oder „ungünstigen“ Zeitpunkten, bzw. bei einer hohen oder niedrigen Verfügbarkeit von Elektrizität bezogen wird. Als Referenzgrößen dienen hier die vier genannten Größen. So bedeutet etwa ein Wert LGMCabs(EEX) von 0,95, dass Strom – im gewichteten Mittel – zu 95 % des Durchschnitts-EEX-Preises im Analysezeitraum bezogen wird, also 5% günstiger als bei einem zeitlich konstanten Strombezug. Die dimensionslose Kennzahl ist für beliebige Stromverbraucher, Referenzgrößen und Auswertungszeiträume anwendbar (Abbildung 7).

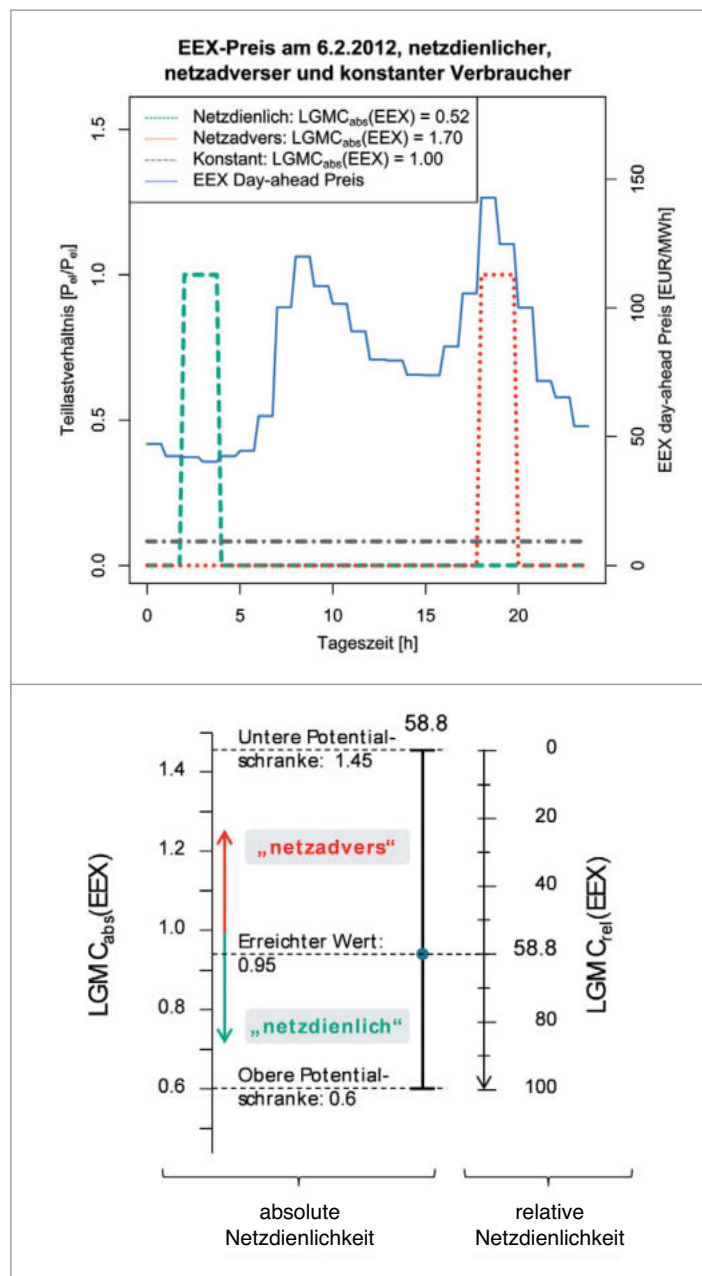


Abbildung 7
Bewertung der Netzdienlichkeit von Wärmepumpen.

Oben: Beispiel für „netzdienliches“ (grün) und „netzadverses“ (rot) Strombezugsprofil bezogen auf den EEX-Preis (blau).

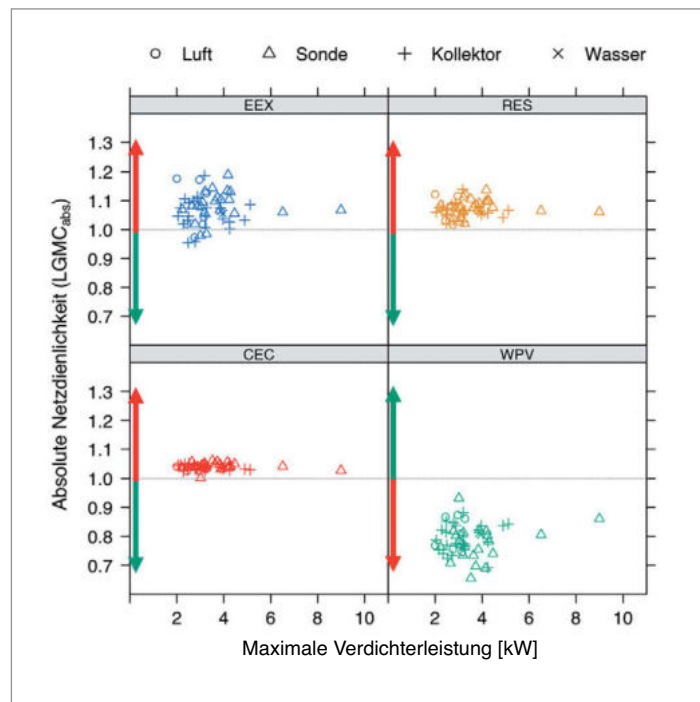
Unten: Prinzipdarstellung der absoluten ($LGMC_{abs}$) und der relativen ($LGMC_{rel}$) Netzdienlichkeit: Beispielsweise bedeutet ein erreichter Wert $LGMC_{abs}(EEX)=0.95$, dass Strom zu 95 % des Durchschnitts-EEX-Preises bezogen wird. $LGMC_{rel}$ setzt den erreichten $LGMC_{abs}$ auf einer Skala von 0 bis 100 ins Verhältnis zum schlechtesten bzw. besten erreichbaren Wert.
 (Quelle: Fraunhofer ISE)

Abbildung 8

Netzdienlichkeit

LGM_{abs} von 40 gemessenen Wärmepumpensystemen für verschiedene Netzkenngößen. Für die Kenngrößen KEV, Residuallast und EEX-Preis sind Werte > 1 eher netz-advers. Für den Indikator Wind- und PV-Anteil dreht sich die Richtung des Indikators um.

(Quelle: Fraunhofer ISE)



Für die Analyse wird der Strombezug zur Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen mit Nennleistungen zwischen 2 und 10 kWth auf Basis von zeitlich hochaufgelösten Langzeit-Messdaten von 40 Wohngebäuden ausgewertet. Die Auswertung zeigt, dass sämtliche Wärmepumpen trotz unterschiedlicher täglicher Strombezugsprofile in Bezug auf die drei Kenngrößen EEX, Residuallast und kumulierter Energieverbrauch und Anteil Wind und PV „netzneutral“ mit einer leichten Tendenz „netz-advers“ betrieben werden. Für einen netzdienlichen Betrieb zeigt sich, dass aufgrund des typischen Tagesprofils und der jahreszeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom eine Anpassung des Betriebes der Wärmepumpen notwendig ist, um sie „netzdienlich“ zu betreiben (Abbildung 8).

PV-Anlage und Wärmeversorgung kann ein Eigenverbrauchsanteil von rund 30 % erreicht werden. Durch Einsatz von Batteriespeichern lässt sich der Eigenverbrauchsanteil deutlich erhöhen auf rund 50 %. Mit Batteriemangement lässt sich auch die Netzbelastung reduzieren. Eine weitere deutliche Erhöhung der Eigenversorgung durch zeitliche Anpassung des Bedarfs an das Solarangebot ist mittels angepasstem Betrieb der Wärmepumpe (Lastmanagement/modellprädiktive Regelung) zu erreichen: der Anteil eigen genutzten Stroms lässt sich so auf rund 70 % erhöhen, gleichzeitig kann die Netzbelastung reduziert werden. *Abbildung 9* zeigt den Tagesverlauf eines Speichersystems mit direktem Laden im Vergleich zu verzögertem Laden für eine optimierte Regelung.

3.2 Lastverschiebepotenziale Wärmepumpensysteme: Regelung

Unter den derzeitigen energiewirtschaftlichen Randbedingungen gibt es zwei Optimierungsziele für die Wärmepumpensteuerung und die Speichernutzung:

- Erreichung eines möglichst hohen Eigenverbrauchs
- möglichst geringe Weitergabe von Leistungsspitzen ins Netz.

Simulationsstudien des ZSW und des Fraunhofer ISE zeigen die Lastverschiebepotenziale von Wärmepumpensystemen auf. Ein Ansatz ist der Einsatz von Batteriespeichern und die Optimierung der Regelung. Bei einem Einfamilienhaus mit einer an den Jahresverbrauch der Haushaltsgeräte angepassten

Ein weiterer wichtiger Beitrag ist eine angepasste Dimensionierung der Wärmeversorgungssysteme, neben der Erhöhung der thermischen Speicherkapazität ist auch durch eine Erhöhung der installierten Wärmeleistung ein besseres Lastmanagement möglich. Durch die Kombination der Maßnahmen optimierte Regelung, Erhöhung der thermischen Speicherkapazität auf das Vierfache und Verdopplung der installierten Leistung lässt sich der Anteil von Stunden mit netzdienlichem Betrieb von 40 % auf 70 % erhöhen – auch ohne Einsatz eines Batteriespeichers. Mit der Erhöhung der Flexibilitätsoptionen geht allerdings eine reduzierte Energieeffizienz der Anlagen einher, der Aufwand steigt um bis zu 10 % aufgrund der Speicher- und Regelungsverluste.

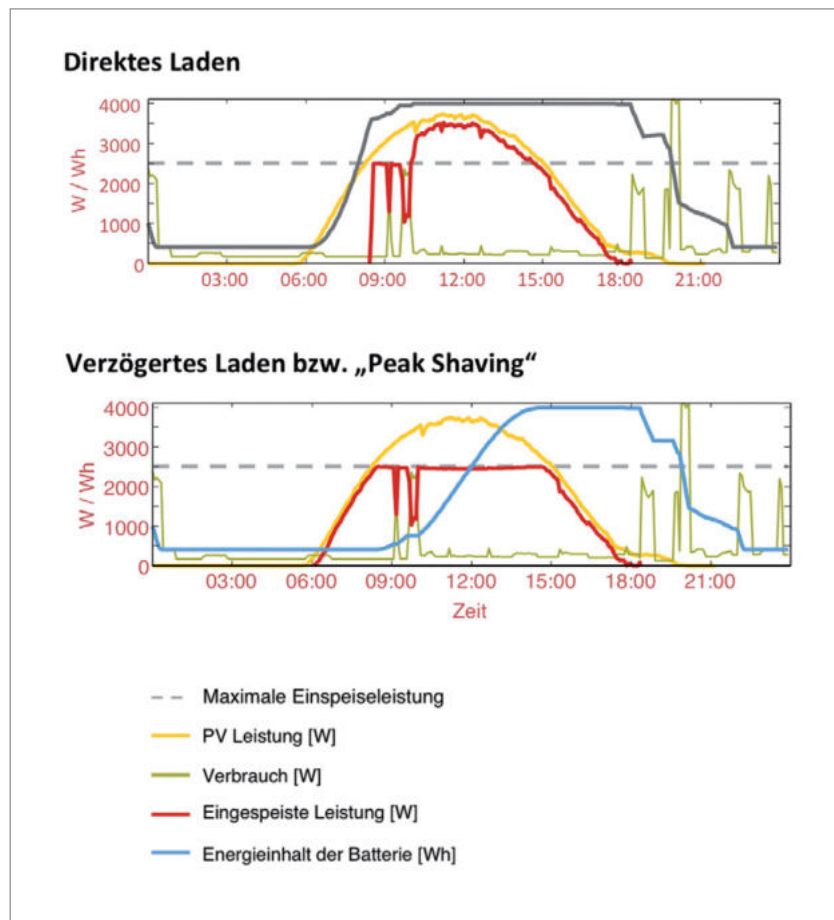


Abbildung 9

Optimierung der Beladung eines Batteriespeichers in einem PV-Wärmepumpensystem.

Quelle: ZSW

4 Fazit

Die Dekarbonisierung von Wärmeversorgungssystemen ist zusammen mit der Reduzierung des Nutzwärmebedarfs ein wesentlicher Ansatz zur Erreichung der Energiewendeziele. Die Nutzung von Umwelt- und Solarwärme in großem Umfang in Neubau und Bestandsgebäuden erfordert eine systemische Herangehensweise an das Thema und ist eine Voraussetzung für den Umbau im Heizungskeller.

Energiewirtschaftlich zeigt sich, dass elektrische Wärmepumpen eine zentrale Technologie werden. Thermische Wärmepumpen und fossil-elektrische Hybridsysteme erlauben eine schnelle Umstellung bei gut ausgebautem Gasnetz. Mikro-KWK und Biomassekessel haben ihr Einsatzgebiet dort, wo hohe Systemtemperaturen unvermeidlich sind.

Technologisch werden durch den Einsatz neuer Kompositmaterialien und die Veränderung des Systemlayouts Performanceverbesserungen erzielt.

Die systemischen Aspekte werden wichtiger. Zum einen ist die Integration in die Sanierungsprozesse notwendig sowie eine Anpassung und Optimierung der Quellen- und Senkenseite der Systeme. Zum anderen schafft die Anpassung der Regelung an Anforderungen der Netze und des Energiemarktes notwendige Flexibilitätsoptionen.